Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambientales

“Estudio comparativo de dos procesos biológicos para el aprovechamiento de los lodos generados en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A”

Presenta:

Ing. Mariana Mendoza Sánchez

Asesora:

Dra. Rosa María Espinosa Valdemar

Co-asesora:

Dra. Perla Xochitl Sotelo Navarro

Ciudad de México a 26 junio de 2020

Resumen

El tratamiento de las aguas residuales conlleva la generación de residuos conocidos como lodos, que son un problema en las Plantas de Tratamiento, debido a que se producen en grandes cantidades y a que se requiere estabilizarlos para disponerlos de manera adecuada.

Pocas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales estabilizan sus lodos, debido a que no cuentan con las instalaciones y/o el presupuesto, por lo que éstos son descargados en grandes cantidades al alcantarillado. En México, se desconoce la cantidad de lodos que se generan ya que no se cuenta con un inventario, esta problemática es muy importante dado que los lodos son susceptibles de ser aprovechados en procesos biológicos debido a su contenido de material orgánico y nutrientes.

Este proyecto tuvo como objetivo demostrar la factibilidad de dos procesos biológicos para la estabilización de los lodos fisicoquímicos provenientes de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM Azcapotzalco.

La experimentación consistió en tratar los lodos mediante digestión anaerobia y composteo. Para cumplir con las condiciones necesarias de cada proceso se emplearon, como cosustratos, residuos de jardinería y estiércol de vaca en diferentes mezclas y proporciones.

La digestión anaerobia se llevó a cabo en condiciones mesofílicas, como inóculo se utilizó estiércol de vaca en 20% de volumen, se trabajó en lote con reactores de 60 L con agitación a 30°C. Durante la digestión anaerobia se analizó la calidad y cantidad de biogás producido.

El proceso de composteo se evaluó en pilas de 0.5 m³, se monitoreó la temperatura, se controló la humedad y la aireación de las pilas.

Al término de los procesos se evaluó la calidad de los productos finales, digestato (material residual resultante de la digestión) y composta, por lo que se analizaron *Salmonella spp*, coliformes fecales, huevos de helmintos, características fisicoquímicas y metales pesados (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd) acorde con la NOM-004-SEMARNAT-2002. También se analizó el contenido de aluminio debido a que está presente en los lodos fisicoquímicos ya que se emplea sulfato de aluminio como coagulante para el tratamiento de las aguas residuales.

Además, se realizaron pruebas de fitotoxicidad con dos especies vegetales (girasol y cempaxúchitl), tanto con los digestatos como con la composta.

El mayor rendimiento de metano se obtuvo en el tratamiento L80-I20 (mezcla de lodos con inóculo en una relación 80:20) con 9.5 mLCH₄/gsv, mientras que el lodo por sí solo (L100) no generó metano. Por lo anterior, se demuestra que los lodos de origen fisicoquímico pueden ser aprovechados en la co-digestión de residuos de jardinería y estiércol para la generación de metano.

En los digestatos, el contenido de coliformes (totales y fecales) tuvo una eficiencia de disminución entre 86-99%, cumpliendo con el límite establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002, con excepción de los lodos. Los huevos de helminto no sobrepasaron el límite establecido. *Salmonella* no cumple con el límite permisible, por lo que se sugiere realizar un proceso adicional para disminuir la carga de este microorganismo. En los metales pesados el digestato L100 (lodos) no cumple con el límite de 39 mg/kg de cadmio.

Las compostas cumplen con los límites máximos permisibles de metales pesados para una calidad excelente de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002. Además, se cumple con el límite de huevos de helmintos y coliformes fecales, las compostas RJ-L (residuos de jardinería y lodos) y RJ-I-L (residuos de jardinería, inóculo y lodos) tuvieron una eficiencia de remoción de coliformes fecales del 97%. Sin embargo, tampoco se cumplió con el límite permisible de *Salmonella*. Por lo que, también se sugiere realizar otro proceso para estabilizar este parámetro.

En cuanto a las pruebas de fitotoxicidad, se emplearon los digestatos y las compostas como mejoradores de suelos, en una proporción de 20% y 80% suelo. Se observó que el girasol presentó el menor crecimiento de raíz en los digestatos L100 e I100 (únicamente estiércol), mientras que, los digestatos L50-RJ50 (lodos y residuos de jardinería) y L40-RJ40-I20 (lodos, residuos de jardinería y estiércol) resultaron favorecer el crecimiento de la raíz. Sin embargo, el cempaxúchitl no creció en el digestato I100. Las compostas tuvieron un crecimiento similar al del testigo para ambas especies vegetales.

Para ambos productos finales se obtuvo una calidad C, por lo que los productos podrían emplearse en uso forestal, mejorador de suelos y usos agrícolas, una vez que se disminuya la cantidad de *Salmonella spp.*

Los productos finales pueden emplearse como mejoradores de suelos, debido a que las especies vegetales ensayadas no presentaron fitotoxicidad respecto al testigo.

Los resultados de este trabajo son alentadores y marcan un avance importante en el tratamiento biológico de lodos de tipo fisicoquímicos (con sulfato de aluminio), en este caso particular los lodos de la PPTAR y de los residuos de jardinería de la UAMA, ya que se demostró que sus propiedades no inhibieron ninguno de los dos procesos al ser mezclados con otros residuos. Además, en general se cumplieron los límites de

coliformes fecales, helmintos y metales. Queda pendiente aumentar la eficiencia de eliminación de algunos patógenos, aunque es un porcentaje muy pequeño el que falta, lo cual podría alcanzarse aumentando el tiempo de experimentación o dando un tratamiento adicional.

Finalmente, estos resultados permiten contribuir al tratamiento de dos residuos que se generan en cantidades importantes en la UAM A, contribuyendo de esta forma a la transición a una universidad sustentable.

Abstract

The treatment of wastewater involves the generation of waste known as sludge, which is a problem in Treatment Plants because it is produced in large quantities and requires stabilization to dispose of it properly.

Few Wastewater Treatment Plants stabilize their sludge, because they don't have the facilities and/or the budget, so they are discharged in large quantities to the sewer. In Mexico, sludge generation is unknown because there is not an inventory, this problem is very important because the sludge is susceptible to being used in biological processes due to its content of organic material and nutrients.

The objective of this project was to demonstrate the feasibility of two biological processes for the stabilization of the physicochemical sludge from the Pilot Plant for the Treatment of Wastewater of UAM Azcapotzalco.

The experimentation consisted of treating the sludge by anaerobic digestion and composting, to comply with the necessary conditions of each process, gardening residues and cow manure in different mixtures and proportions were used as co-substrates.

Anaerobic digestion was consisted in mesophilic conditions, cow dung in 20% of the volume was used, batch work was carried out with 60 L reactors with mixing at 30 °C. During anaerobic digestion, the quality and quantity of biogas produced were analyzed.

In the composting process, it was evaluated in 0.5 m³ piles, the temperature was monitored, the humidity and the aeration of the piles were controlled.

At the end of the processes, the quality of the final products, digestate and compost were evaluated, therefore, *Salmonella spp.*, fecal coliforms, helminth eggs, physicochemical characteristics and heavy metals (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd) were analyzed with NOM-004-SEMARNAT-2002. The aluminum content was also analyzed because it is present in the physicochemical sludge and aluminum sulfate is used as a coagulant for the treatment of wastewater.

Also, phytotoxicity tests performed on two plant species (sunflower and cempaxuchitl), both the digestate as compost.

The highest yield of methane was obtained in the L80-I20 treatment (mixed sludge inoculum in a ratio 80:20) with 9.5 mLCH₄/gVS, while the sludge did not generate methane. Therefore, it is shown that the muds of physicochemical origin can be used in the generation of methane.

In the digestates, the coliform content (total and fecal) had a decreased efficiency between 86-99%, complying with the established limit, except for sludge. The helminth eggs did not exceed the established limit. *Salmonella* does not meet the permissible limit, so it is suggested to carry out an additional process to decrease the load of this microorganism. In heavy metals, L100 digestate (sludge) does not meet the limit of 39 mg/kg cadmium.

Composts comply with the maximum permissible limits of heavy metals for excellent quality by NOM-004-SEMARNAT-2002. Also, the helminth egg and fecal coliform limit are met, compost RJ-L (garden waste and sludge) and RJ-I-L (garden waste, inoculum, and sludge) had a fecal coliform removal efficiency of 97 %. However, the permissible limit for *Salmonella* spp was also not met. Therefore, it is also suggested to carry out another process to stabilize this parameter.

Regarding phytotoxicity tests, digestates and compost were used as soil improvers, in a proportion of 20% and 80% soil. It was observed that sunflower presented the lowest root growth in L100 and I100 digestates (only manure), while that L50-RJ50 (sludge and garden waste) and L40-RJ40-I20 (sludge, garden waste and manure) digestates were found to favor root growth. However, the cempaxuchitl did not grow in the I100 digestate. Composts had a growth like that of the control for both plant species.

A quality C was obtained for both end products, so the products could be used in forestry, soil improver and agricultural uses once that amount of *Salmonella* spp is decreased.

The final products can be used as soil improvers since the plant species tested did not present phytotoxicity concerning the control.

The results of this work are encouraging and mark an important advance in the biological treatment of physicochemical sludge (with aluminum sulfate), in this particular case the sludge from the PPTAR and garden waste of UAMA since showed that its properties did not inhibit either of the two processes when mixed with other residues.

Besides, the limits of fecal coliforms, helminths and metals were generally met. It remains to increase the elimination efficiency of some pathogens, but a very small percentage is missing, which could be achieved by increasing the experimentation time or giving additional treatment.

Finally, these results make it possible to contribute to the treatment of two wastes that are generated in significant quantities at the UAM A, thus contributing to the construction of a sustainable university.

Dedicatoria

A mi mamá por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado.

A Domingo y Angela, mis queridos abuelitos por su apoyo y cuidados que me han dado.

A mi hermana por su ayuda y valiosa compañía

A todos los que me han apoyado familiares, amigos y compañeros, muchas gracias por sus consejos.

Agradecimientos

A mis asesoras la doctora Rosa María Espinosa Valdemar y la doctora Perla Xochitl Sotelo Navarro, quienes me brindaron su apoyo constante y su entrega en la culminación de este proyecto.

A mis sinodales la Dra. Maribel Velasco Pérez, Dra. Ana Belem Piña Guzmán, M. en C. Margarita Beltrán Villavicencio y al Dr. Fabián Robles Martínez, por su interés y apoyo en la revisión de este trabajo.

Este proyecto se realizó en las instalaciones del laboratorio de tecnologías sustentables, agradezco el apoyo, colaboración y paciencia de sus integrantes, Karen Yazmín, Areanely, Alexis, Karina, Daniel, Guillermo, Ana Laura y Abraham. A los encargados Juan Carlos Alvarez Zeferino y Xochitl Quecholac Piña por su amistad y sus conocimientos.

A mis compañeros y colegas Carlos Martín Hernández Robledo, Agni Yair Bazán Medina y Juan Manuel Mora Rodríguez por su valioso apoyo.

A la ingeniera Itzel Rubí y a su equipo de Separación por los recursos y su valioso apoyo en la realización de este proyecto.

Al equipo de la PPTAR, en especial a Adán Pérez por brindarme en todo momento su apoyo y colaboración.

Al ingeniero Mauricio Cano y a Vicente por su colaboración, creatividad y apoyo en el diseño de los agitadores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada la cual me permitió concluir este proyecto.

A mi alma máter Universidad Autónoma Metropolitana por su apoyo y motivación, siendo lo más valioso su cuerpo docente quienes día a día complementaron mi formación.

Tabla de contenido

Resumen.....	ii
Abstract.....	v
Dedicatoria	vii
Agradecimientos	viii
Tabla de contenido.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tablas.....	xv
Notación.....	xvii
1 Introducción	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación	3
2 Objetivos e hipótesis.....	5
2.1 Objetivo general.....	5
2.2 Objetivos específicos	5
2.3 Hipótesis.....	5
3 Marco teórico	7
3.1 Aguas residuales	7
3.2 Tratamiento de las aguas residuales en México	7
3.3 Tratamiento de las aguas residuales en la PPTAR	9
3.4 Lodos residuales.....	11
3.4.1 Generación de lodos en México	11
3.4.2 Generación de lodos en la PPTAR de la UAM-Azcapotzalco.....	12
3.5 Tratamientos de estabilización de los lodos residuales.....	12
3.5.1 Composteo	13
3.5.1.1 Factores de importancia del composteo	13
3.5.1.2 Etapas del composteo	14

3.5.2	Digestión anaerobia.....	15
3.5.2.1	Factores de importancia en la digestión anaerobia.....	15
3.5.2.2	Etapas de la digestión anaerobia.....	17
3.6	Normatividad relacionada con lodos residuales	19
4	Estado del arte.....	21
4.1	Estudios de caso de tratamientos de lodos residuales.....	21
4.2	Estudios de caso de tratamientos de los lodos generados en la PPTAR	23
5	Metodología	25
5.1	Obtención de los lodos, residuos de jardinería e inóculo	26
5.1.1	Lodos residuales	26
5.1.2	Residuos de jardinería	26
5.1.3	Inóculo.....	27
5.2	Caracterización inicial de los lodos, residuos de jardinería, inóculo y mezclas	28
5.3	Construcción de los reactores para digestión anaerobia.....	29
5.4	Montaje del proceso de digestión anaerobia	31
5.4.1	Monitoreo del proceso de digestión anaerobia.....	31
5.4.1.1	Caracterización del biogás	32
5.4.1.2	Cuantificación del biogás.....	32
5.5	Montaje del proceso de composteo	33
5.5.1	Monitoreo del proceso de composteo	33
5.5.1.1	Temperatura.....	33
5.5.1.2	Humedad.....	34
5.5.1.3	Aireación manual.....	34
5.6	Tamizado de digestatos y compostas	35
5.7	Caracterización de digestatos y compostas	36
5.7.1	Parámetros fisicoquímicos.....	36
5.7.1.1	Humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, materia orgánica, carbono y cenizas	36
5.7.1.2	pH, conductividad y alcalinidad.....	38
5.7.1.3	Nitrógeno.....	38

5.7.1.4	Macronutrientes.....	40
5.7.1.5	Elementos traza	42
5.7.2	Parámetros microbiológicos.....	42
5.7.2.1	Coliformes totales y fecales.....	43
5.7.2.2	<i>Salmonella spp.</i>	44
5.7.2.3	Huevos de helmintos	47
5.8	Pruebas de fitotoxicidad.....	48
5.8.1	Viabilidad de las semillas según la OCDE	48
5.8.2	Índice de germinación de acuerdo con la NADF-020-AMBT-2011	48
5.8.3	Prueba de fitotoxicidad en plántulas según la OCDE.....	49
6	Resultados y discusión	53
6.1	Obtención de los lodos, residuos de jardinería e inóculo	53
6.2	Digestión anaerobia	53
6.2.1	Construcción de reactores.....	53
6.2.2	Montaje del proceso de digestión anaerobia.....	54
6.2.3	Caracterización de los lodos, residuos de jardinería, inóculo y de las mezclas sometidas a digestión	54
6.2.3.1	Parámetros fisicoquímicos.....	55
6.2.3.2	Parámetros microbiológicos iniciales	56
6.2.4	Caracterización del biogás.....	56
6.2.5	Cuantificación del biogás	58
6.2.6	Caracterización de los digestatos	59
6.2.6.1	Parámetros fisicoquímicos.....	59
6.2.6.2	Parámetros microbiológicos	62
6.3	Composteo	64
6.3.1	Caracterización inicial de las mezclas empleadas en el composteo	64
6.3.1.1	Parámetros fisicoquímicos.....	64
6.3.1.2	Parámetros microbiológicos	65
6.3.2	Temperatura	66
6.3.3	Caracterización de las compostas	67

6.3.3.1	Parámetros fisicoquímicos.....	67
6.3.3.2	Parámetros microbiológicos	69
6.4	Pruebas de fitotoxicidad.....	72
6.4.1	Ensayo de viabilidad de las semillas.....	73
6.4.2	Índice de germinación.....	74
6.4.2.1	Índice de germinación de los digestatos en girasol y cempaxúchitl	74
6.4.2.2	Índice de germinación de las compostas en girasol y cempaxúchitl	74
6.4.3	Prueba de emergencia y crecimiento en plántulas.....	75
6.4.3.1	Crecimiento y biomasa del girasol empleando los digestatos en suelo	75
6.4.3.2	Crecimiento y biomasa del cempaxúchitl empleando los digestatos en suelo	79
6.4.3.3	Crecimiento y biomasa del girasol empleando las compostas en suelo	82
6.4.3.4	Crecimiento y biomasa del cempaxúchitl empleando las compostas en suelo	84
6.5	Calidad de los productos finales	87
7	Conclusiones	91
8	Recomendaciones	95
9	Referencias bibliográficas	97
Anexo A		104
Anexo B		107

Índice de Figuras

Figura 3-1. Plantas de aguas residuales por tratamientos	8
Figura 3-2. Plano de la UAM-A, ubicación de la PPTAR.	9
Figura 3-3. Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales	10
Figura 3-4. Tren de tratamiento	11
Figura 3-5. Dimensiones de una pila de composteo	14
Figura 3-6. Fases del composteo	15
Figura 3-7. Etapas de la digestión anaerobia	18
Figura 5-1. Metodología general empleada	25
Figura 5-2. Metodología de la obtención de los materiales para la digestión anaerobia	26
Figura 5-3. Llenado y transporte de los residuos de jardinería	26
Figura 5-4. Establo donde se obtuvo el inóculo	27
Figura 5-5. Reactor para el proceso de digestión anaerobia	29
Figura 5-6. Reactores anaerobios	31
Figura 5-7. Diagrama del proceso de caracterización del biogás	32
Figura 5-8. Cuantificación del biogás	32
Figura 5-9. Metodología del montaje de las pilas de composta	33
Figura 5-10. Monitoreo de la temperatura en pilas de composta	34
Figura 5-11. Aireación de las pilas de composta	34
Figura 5-12. Aglomerados que se forman en las compostas	35
Figura 5-13. Tamizado de los digestatos.....	35
Figura 5-14. Tamizado de las compostas.....	36
Figura 5-15. Determinación de humedad, ST, SV, materia orgánica, C y cenizas	37
Figura 5-16. Técnica para las pruebas de pH, conductividad y alcalinidad.....	38
Figura 5-17. Metodología para nitrógeno total	39
Figura 5-18. Preparación de la solución extracto.....	40
Figura 5-19. Prueba de nitrógeno mediante kit HANNA®.....	40
Figura 5-20. Prueba de fósforo mediante kit HANNA®.....	41
Figura 5-21. Prueba de potasio mediante kit HANNA®	41
Figura 5-22. Metodología para la digestión de muestras para absorción atómica	42
Figura 5-23. Obtención de las diluciones y prueba presuntiva.....	43
Figura 5-24. Técnica para la prueba confirmativa de coliformes totales	44
Figura 5-25. Técnica para la prueba presuntiva de coliformes fecales	44
Figura 5-26. Etapa de enriquecimiento.....	45
Figura 5-27. Prueba para la cuantificación de <i>Salmonella spp.</i>	45
Figura 5-28. Identificación y pruebas bioquímicas de <i>Salmonella spp.</i>	46
Figura 5-29. Metodología para la determinación de huevos de helmintos	47
Figura 5-30. Prueba de viabilidad.....	48

Figura 5-31. Metodología para la prueba de índice de germinación en semillas.....	49
Figura 5-32. Distribución del sustrato en los rizotrones	50
Figura 5-33. Metodología de toxicidad en plántulas	50
Figura 5-34. Análisis estadísticos realizados	51
Figura 6-1. Tapa de los reactores.....	53
Figura 6-2. Generación de metano.....	57
Figura 6-3. Producción de biogás.....	58
Figura 6-4. Pilas de composta a) inicio y b) final del composteo	64
Figura 6-5. Tubos positivos para coliformes totales y coliformes fecales.....	66
Figura 6-6. Comportamiento de la temperatura en el composteo	67
Figura 6-7. Rizotrones empleados para la prueba de fitotoxicidad	72
Figura 6-8. Temperatura del invernadero para la prueba de fitotoxicidad	72
Figura 6-9. Humedad promedio del invernadero	73
Figura 6-10. Crecimiento de raíz y parte aérea del girasol en suelo-digestato	76
Figura 6-11. Caja y bigotes del crecimiento de raíz para girasol en suelo-digestato.....	76
Figura 6-12. Caja y bigotes del crecimiento de la parte aérea para girasol en suelo-digestato	77
Figura 6-13. Generación de biomasa seca del girasol en suelo-digestato	77
Figura 6-14. Biomasa seca para la parte aérea del girasol en suelo-digestato	78
Figura 6-15. Crecimiento de raíz y parte aérea del cempaxúchitl en suelo-digestato	79
Figura 6-16. Caja y bigotes del crecimiento de la parte aérea para cempaxúchitl en suelo-digestato	80
Figura 6-17. Generación de biomasa seca del cempaxúchitl en suelo-digestato.....	80
Figura 6-18. Caja y bigotes de la biomasa seca para la raíz del cempaxúchitl en suelo-digestato	81
Figura 6-19. Caja y bigotes de la biomasa seca para la parte aérea del cempaxúchitl en suelo-digestato.....	81
Figura 6-20. Crecimiento de la raíz y parte aérea del girasol en suelo-composta.....	82
Figura 6-21. Generación de biomasa seca del girasol en suelo-composta	83
Figura 6-22. Caja y bigotes de la biomasa seca de la raíz del girasol en suelo-composta	84
Figura 6-23. Crecimiento de raíz y parte aérea para cempaxúchitl en suelo-composta .	85
Figura 6-24. Generación de biomasa seca para cempaxúchitl en suelo-composta	86
Figura 6-25. Caja y bigotes de la biomasa seca de la parte aérea del cempaxúchitl en suelo- composta.....	87

Índice de Tablas

Tabla 4-1. Trabajos de estabilización de lodos mediante digestión anaerobia	21
Tabla 4-2. Trabajos de estabilización mediante composteo	22
Tabla 4-3. Tratamientos a los que se han sometido los lodos de la PPTAR	23
Tabla 5-1. Parámetros fisicoquímicos y biológicos	28
Tabla 5-2. Especificaciones del material empleado en los reactores	30
Tabla 5-3. Diseño de experimentos de la digestión anaerobia	31
Tabla 5-4. Diseño experimental para el composteo	33
Tabla 6-1. Cantidades de componentes de cada reactor	54
Tabla 6-2. Caracterización fisicoquímica al inicio del proceso de digestión anaerobia ..	55
Tabla 6-3. Caracterización microbiológica inicial	56
Tabla 6-4. Generación de metano en los tratamientos de digestión anaerobia	57
Tabla 6-5. Comparación de la producción de metano empleando lodos residuales	59
Tabla 6-6. Caracterización fisicoquímica de los digestatos obtenidos	60
Tabla 6-7. Concentración de metales en los digestatos	61
Tabla 6-8. Contenido de macronutrientes en los digestatos	62
Tabla 6-9. Caracterización microbiológica final de los digestatos	63
Tabla 6-10. Caracterización fisicoquímica inicial del proceso de composteo	65
Tabla 6-11. Caracterización microbiológica inicial del proceso de composteo	66
Tabla 6-12. Caracterización fisicoquímica final del proceso de composteo	68
Tabla 6-13. Concentración de metales en las compostas	69
Tabla 6-14. Contenido de macronutrientes en las compostas	69
Tabla 6-15. Caracterización microbiológica final	70
Tabla 6-16. Comparación de la calidad de compostas elaboradas con lodos residuales	71
Tabla 6-17. Viabilidad de las semillas	73
Tabla 6-18. Índice de germinación en digestatos	74
Tabla 6-19. Índice de germinación en compostas	75
Tabla 6-20. Prueba de múltiples rangos de la biomasa seca para la raíz del girasol en suelo-digestato	78
Tabla 6-21. Prueba de múltiples rangos de la raíz para cempaxúchitl en suelo-digestato	79
Tabla 6-22. Prueba de múltiples rangos para crecimiento de raíz en girasol en suelo-composta	82
Tabla 6-23. Prueba de múltiples rangos para crecimiento de la parte aérea en girasol en suelo-composta	83
Tabla 6-24. Prueba de múltiples rangos de la biomasa de la parte aérea del girasol en suelo-composta	84

Tabla 6-25. Prueba de múltiples rangos del crecimiento de la raíz del cempaxúchitl en suelo-composta85

Tabla 6-26. Prueba de múltiples rangos de crecimiento de la parte aérea del cempaxúchitl en suelo-composta85

Tabla 6-27. Prueba de múltiples rangos para biomasa de la raíz del cempaxúchitl en suelo-composta86

Tabla 6-28. Tabla comparativa de los procesos de digestión anaerobia y composteo ..88

Tabla 6-29. Resultados finales de la calidad de los productos finales89

Notación

Abreviaturas

ANOVA	Analysis of variance
AR	Aguas residuales
BVB	Bilis verde brillante
C	Carbono total
C/N	Relación carbono-nitrógeno
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CRR	Crecimiento de radícula relativo
E	Estopa de coco
FAO	Food and Agriculture Organization
IG	Índice de germinación
L	Lodo residual
LIA	Lisine iron agar
LP	Lodo primario
LSE	Lodo secundario espesado
MO	Materia orgánica
MV	Material vegetal
N	Nitrógeno total
NMP	Número más probable
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OEFA	Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PGR	Porcentaje de germinación relativa

PPTAR	Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales
RA	Residuos de alimentos
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEP	Secretaría de Educación Pública
SS	Salmonella-Shigella agar
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TSI	Triple sugar iron agar
UAM-A	Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco
XLD	Xylose-Lysine-Deoxycholate agar

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Las aguas residuales (AR) son producto del uso de agua en actividades domésticas e industriales, debido a sus características requieren un tratamiento, para poder reusarlas o vertidas a los cuerpos de agua naturales. Se clasifican como domésticas, industriales y municipales. Existen diversos procesos de tratamiento para las AR, desde los fisicoquímicos hasta los biológicos, en todos ellos existe una generación de lodos (OEFA, 2014).

Los lodos son el acumulado de sólidos y contaminantes removidos del agua residual y son uno de los subproductos de mayor interés para las plantas de tratamiento, debido a su cantidad y al tratamiento de estabilización que se requiere para disponerlos, ya que de esta manera se reduce la atracción de vectores y su volumen (Limón-Macías, 2013).

La cantidad de lodos varía de acuerdo con el tipo de tratamiento asociado. En México, no se cuenta con un inventario de la generación de lodos, para el período de 2006-2012 se estimó una producción de 232 toneladas, esta información no es detallada, es decir, se desconoce su origen, tipo y su disposición final (SEMARNAT, 2013).

La problemática de estos residuos consiste en que pocas plantas de tratamiento estabilizan sus lodos, debido a que carecen de instalaciones y de presupuesto. En muchos casos, gran parte de los lodos se desechan al alcantarillado o se envían a tiraderos a cielo abierto, dejando un residuo sin tratar (Oropeza-García, 2006).

Los lodos deben cumplir con la NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, para ello se emplean diversos tratamientos, en donde se reducen olores, volumen y microorganismos patógenos, los métodos más comúnmente empleados son el composteo y la digestión anaerobia (Limón-Macías, 2013).

1.2 Justificación

La Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco (UAM-A), tiene una Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales (PPTAR) que opera desde el año 2006. Ahí se trata una fracción de las aguas residuales de la unidad, empleando un proceso fisicoquímico y se generan lodos a una razón de 175 L/día.

Anteriormente, los lodos obtenidos de la PPTAR eran sometidos a una estabilización alcalina, proceso que dejaba a los lodos ya estabilizados con un elevado pH (13.1 ± 0.06), por lo que se convertían en residuos peligrosos, limitando su aprovechamiento y obligando a dar nuevamente un tratamiento, lo cual implica mayores costos (García-García, 2016), en la actualidad ya no se realiza la estabilización y se desechan al drenaje.

En este proyecto se presenta una propuesta de tratamiento de los lodos generados en la PPTAR, mediante dos procesos biológicos independientes, composteo y digestión anaerobia, con el objetivo de estabilizarlos y determinar con qué proceso se obtiene un producto final (mejorador de suelo) con mayor calidad (macronutrientes, materia orgánica, pH, C/N, entre otros), que se puedan aprovechar en las áreas verdes de la unidad, contribuyendo así a la sustentabilidad de la universidad.

Capítulo 2

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2 Objetivos e hipótesis

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de dos procesos biológicos para el aprovechamiento de los lodos generados en la PPTAR de la UAM-A.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las características fisicoquímicas y biológicas de los lodos y de los sustratos a utilizar
- Desarrollar un proceso de digestión anaerobia empleando los lodos y evaluar la calidad del biogás obtenido mediante su cuantificación y caracterización
- Desarrollar un proceso de composteo, para producir un mejorador de suelo
- Evaluar los productos finales (composta y digestato) obtenidos, en pruebas de fitotoxicidad empleando dos especies vegetales
- Comparar la calidad de los mejoradores de suelo producidos con base en la normatividad

2.3 Hipótesis

El proceso de composteo tendrá la mejor estabilización, mientras que el proceso de digestión anaerobia producirá metano con buen rendimiento

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

3 Marco teórico

En este capítulo, se presenta la revisión de los tratamientos de las aguas y lodos residuales en México, haciendo énfasis en el caso de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual de la UAM-A, así como de los procesos de composteo y de digestión anaerobia.

3.1 Aguas residuales

Las AR pueden definirse como una mezcla de desechos, en su mayoría líquidos, transportados por el agua, los cuales son desechados por hogares, parques, instituciones y establecimientos comerciales e industriales. Cuando las AR no reciben tratamiento se producen malos olores debido a la descomposición de la materia orgánica, además contienen numerosos microorganismos patógenos y metales pesados (Tchobanoglous, *et al.*, 1995).

Por lo anterior, es importante tratar las AR, para ello existen métodos biológicos y fisicoquímicos, los primeros emplean microorganismos, mientras que, los fisicoquímicos utilizan sustancias químicas (coagulantes, polímeros, floculantes, etc.) y procesos físicos (sedimentación y filtración) (Tchobanoglous *et al.*, 1995).

3.2 Tratamiento de las aguas residuales en México

Las AR se clasifican en municipales, domésticas e industriales, las domésticas son generadas principalmente en los hogares, mientras que las municipales son una mezcla de aguas residuales domésticas, comercios, plazas comerciales, cines, entre otros establecimientos. En cuanto a las industriales son aquellas originadas por las industrias, por ejemplo, alimenticia, textil, papelería, entre otras. Las AR son descargadas a los sistemas de alcantarillado rurales y urbanos (CONAGUA, 2011).

En el año 2017 se estimó que operaron alrededor de 2 526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en el país, las cuales trataron 135.6 m³L/s, lo cual dio lugar a una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 63% (CONAGUA, 2018).

La Figura 3-1 muestra el número de plantas de tratamiento de AR, por proceso, que operaron en el país el año 2016.

Figura 3-1. Plantas de aguas residuales por tratamientos, tomada de CONAGUA, 2016

En general se tiene que los procesos más empleados son las lagunas de estabilización y lodos activados, ambos de tipo biológico.

El tratamiento de lodos activados es eficiente en la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes de la fase líquida, pero a su vez el exceso de lodo producido constituye un problema adicional. El tratamiento y la disposición final de este lodo ocupa una parte significativa de los recursos materiales y financieros necesarios para las plantas de tratamiento de aguas residuales (Van Haandel y Van der Lubbe, 2012).

Las lagunas de estabilización o de maduración, tienen como objetivo mejorar la calidad de los efluentes secundarios. Su operación consiste en la respiración endógena mediante la suministración de oxígeno por aireadores y el generado por algas. Se han propuesto tiempos mínimos de retención entre 18-20 días para conseguir una adecuada respiración endógena de los sólidos residuales (Tchobanoglous *et al.*, 1995).

3.3 Tratamiento de las aguas residuales en la PPTAR

La UAM-A cuenta con una Planta Piloto de Tratamiento de Agua Residual que se puso en marcha gracias a la aportación de recursos de Petróleos Mexicanos (PEMEX), de la Secretaría de Educación Pública (SEP) y de la UAM-A (Aleph, 2007). La PPTAR trata aproximadamente el 10% de las aguas residuales que se generan en la unidad, las cuales provienen principalmente de los edificios M (fotocopiado y mantenimiento), L (ciencias y arte para el diseño), T (cómputo), J (cafetería), I (biblioteca) y Q (área deportiva), la

Figura 3-2, muestra el plano de la UAM-A y la ubicación de la Planta.

Figura 3-2. Plano de la UAM-A, ubicación de la PPTAR. Tomada de Protección Civil UAM-A, n.d.

Los objetivos de la PPTAR, además del tratamiento del agua y su reúso en riego, son colaborar en la formación de profesionistas a través de proyectos de docencia e investigación y producir agua desionizada para cubrir la demanda de los laboratorios.

La PPTAR (Figura 3-3), tiene una capacidad máxima de operación de 45 L/min y lleva 16 años operando a un caudal promedio de 30 L/min. El agua tratada se reutiliza como agua de riego en las áreas verdes y cumple con los criterios de la NOM-003-ECOL-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el ambiente y la salud de la población.

Figura 3-3. Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento que emplea la PPTAR es de tipo fisicoquímico, que busca romper la estabilidad de las partículas coloidales contaminantes del agua, para separarlas. En la Figura 3-4 se muestra el tren de tratamiento de la PPTAR, se cuenta con un cárcamo de bombeo, en el cual se sedimentan las arenas y se trituran los residuos orgánicos de gran tamaño (huesos, carne, cartílago, cáscara de fruta, entre otros) para posteriormente bombear el agua cruda hacia la planta (González-Aragón *et al.*, 2006).

Una vez en la planta se continua con el proceso de coagulación-floculación, en donde a la entrada se le adiciona hipoclorito de sodio (5 ± 0.5 mg/L), sulfato de aluminio (250 ± 50 mg/L) y finalmente polímero (3 ± 0.5 mg/L), con el objetivo de facilitar el proceso de sedimentación; después, el efluente pasa por gravedad a las columnas de filtración en donde se eliminan las partículas pequeñas. Posteriormente, el agua tiene contacto con ozono antes de pasar a las columnas empacadas de carbón activado (proceso de adsorción). Finalmente, en la etapa de desinfección, el efluente pasa a un dispositivo de microfiltración, seguido de una lámpara de luz ultravioleta y la adición de hipoclorito de sodio (10 mg/L), terminado el tratamiento se procede a su almacenaje y distribución para el riego de las áreas verdes (González-Aragón *et al.*, 2006).

Figura 3-4. Tren de tratamiento, tomada de PPTAR, 2012

3.4 Lodos residuales

Los sólidos removidos del agua residual son considerados como lodos (CONAGUA, 2007). Se producen en las etapas de sedimentación primaria y secundaria. Los lodos que se generan en la etapa de sedimentación primaria son llamados lodos primarios, donde se eliminan los sólidos sedimentables, si la sedimentación primaria emplea agentes químicos se produce una mayor cantidad de lodos. Los lodos secundarios que se generan en los reactores biológicos son almacenados y concentrados para su posterior disposición (Limón-Macías, 2013).

La disposición de los lodos ha sido y continúa siendo una de las problemáticas más complejas en el tratamiento de aguas residuales, debido a que cada vez es más difícil encontrar sitios de disposición final capaces de satisfacer las necesidades ambientales, sociales y económicas. De acuerdo con lo anterior, el tratamiento de estabilización y disposición de los lodos residuales representa un reto para la ingeniería ambiental (Tchobanoglous *et al.*, 1995).

3.4.1 Generación de lodos en México

Actualmente no se cuenta con una cifra oficial reportada sobre la generación de lodos producidos en el país y son pocas las plantas de tratamiento de aguas residuales que realizan algún proceso de estabilización, debido a que la mayoría carece de infraestructura y suministros para realizar la estabilización y disponer adecuadamente los lodos generados (Oropeza-García, 2006).

Entre los métodos empleados para la estabilización se tienen la digestión aerobia (proceso de aireación prolongada en medio líquido) y el tratamiento con cal (para incrementar el pH y así inactivar a los microorganismos patógenos), debido a su facilidad de operación y bajos costos (Oropeza-García, 2006).

El composteo es poco empleado y muy rara vez se aplica la digestión anaerobia (Moeller, 1997, citado por Oropeza-García, 2006).

En México, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco ubicada en el estado de Hidalgo, emplea los lodos del tratamiento biológico en un proceso de digestión anaerobia, con lo cual se genera un 80% de la energía que requiere la planta.

3.4.2 Generación de lodos en la PPTAR de la UAM-Azcapotzalco

La PPTAR produce lodos residuales fisicoquímicos a una razón de 175 L/d, estos lodos se generan en el sedimentador primario, los cuales provienen del tanque de coagulación-floculación, en el que se suministra sulfato de aluminio, hipoclorito y un polímero (poliacrilamida).

Las poliacrilamidas catiónicas, aniónicas y no iónicas se usan en el tratamiento de potabilización de agua y tratamiento de aguas residuales, las cuales facilitan la remoción de partículas finas en suspensión y material coloidal. Su uso es efectivo en la eliminación del turbidez y color cuando se usa en conjunto con sales metálicas (Centro de Calidad Ambiental, 2007).

En la actualidad, estos lodos son descargados en el drenaje, cuando se estabilizan se les adiciona cal Ca(OH)_2 y se secan mediante un filtro prensa. Esta metodología se dejó de aplicar ya que el lodo estabilizado quedaba con un pH arriba de 13 (debido a la proporción que se utilizaba de 1.2 kg Ca(OH)_2 /kg lodos) siendo corrosivo, lo cual requería de un proceso adicional para neutralizar el pH, y esto implicaba un costo y tiempo de operación adicional.

3.5 Tratamientos de estabilización de los lodos residuales

El objetivo principal del tratamiento de estabilización de los lodos consiste en: (CONAGUA, 2007):

- a) Reducción de volumen y de olores: pueden emplearse procedimientos de espesamiento, deshidratación por drenaje natural, secado térmico e incineración.
- b) Reducción del material putrescible y el contenido de microorganismos patógenos causantes de enfermedades.

Los tratamientos más empleados desde el 2006 para la estabilización de lodos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Estados Unidos y Europa son básicamente los siguientes (Oropeza-García, 2006):

- Tratamiento químico: tiene un efecto germinicida, el empleo de cal es el más utilizado debido a su reducido costo y alta alcalinidad.
- Incineración: consiste en la quema de la materia orgánica presente en los lodos, con esto se tiene una disminución de la masa. Las cenizas son material mineral del lodo.
- Digestión anaerobia: engloba dos fases importantes, en la primera se obtienen ácidos grasos volátiles (AGV) y en la siguiente fase se produce CH_4 a partir de estos ácidos, esto se realiza en ausencia de oxígeno.
- Digestión aerobia: es un proceso de aireación prolongada, para estimular el desarrollo de microorganismos aerobios hasta obligarlos a llegar a la fase endógena, generalmente se utiliza el proceso de composteo.

3.5.1 Composteo

El composteo es un tratamiento biológico aerobio exotérmico que tiene como objetivo transformar la materia orgánica biodegradable de los residuos (frutas, excrementos de animales, hojarasca, entre otros) hacia formas más estables (humus). Esto se realiza mediante microorganismos, tales como hongos, actinomicetos y bacterias, los cuales necesitan condiciones ambientales controladas que favorezcan el aumento de la temperatura (comúnmente entre 55-60°C) para la eliminación de patógenos (Kiely, 1999, citado por Torres *et al.*, 2007).

3.5.1.1 Factores de importancia del composteo

Debido a que este proceso depende de la actividad de los microorganismos, es necesario brindar al sistema condiciones óptimas para que estos puedan degradar la materia orgánica adecuadamente, para ello se consideran a los siguientes factores como los más importantes (Robles-Mitma, 2015; Román *et al.*, 2013):

- Tamaño de partícula: se recomienda un tamaño entre 5 y 20 cm. Se debe considerar que la aireación y la retención de humedad de la pila, están asociados con el tamaño de la partícula.
- Temperatura: está en relación con la etapa del proceso, pero se considera un intervalo de 35-65°C. Se recomienda que la temperatura no disminuya rápidamente, ya que, si se mantienen por más tiempo temperaturas elevadas, mayor será la descomposición y eliminación de patógenos.
- Humedad: el intervalo óptimo es del 45 al 60%, aunque varía dependiendo de los elementos que se compostean y del sistema utilizado. Si el contenido de humedad disminuye de 45%, la actividad microbiana desciende sin completar la degradación. Si la humedad es superior al 60% los poros se saturarán por el agua y esto afectará la aireación de la pila, llevando a la anaerobiosis.

- pH: depende de los materiales que se someterán en el proceso y varía de acuerdo con las fases del proceso (desde 4.5 a 8.5). El pH ideal es pH 5.8–7.2, cercano a la neutralidad, el cual garantiza un desarrollo favorable de la mayoría de los microorganismos.
- Aireación: debido a la naturaleza del proceso se requiere la existencia de oxígeno, por lo que es necesario airear constantemente para evitar putrefacciones.
- Relación C/N: la relación óptima al inicio del proceso está entre 25:1 a 35:1, una adecuada relación favorecerá un adecuado crecimiento y reproducción de los microorganismos. El carbono es una fuente directa de energía para los microorganismos y el nitrógeno permite la síntesis proteica.
- Tamaño de la pila: se recomiendan pilas de 1.5-2 metros de alto, para agilizar el volteo y 1.5-3 metros de ancho, la longitud dependerá del espacio disponible (Figura 3-5).

Figura 3-5. Dimensiones de una pila de composteo, tomada de Román *et al.*, 2013

3.5.1.2 Etapas del composteo

La temperatura generada durante el proceso es un parámetro importante ya que con base en ella se tienen tres principales etapas y una etapa de maduración (Román *et al.*, 2013):

1. Fase mesófila: en esta etapa se aumenta la temperatura hasta los 45°C en pocos días, debido a la actividad microbiana, ya que los microorganismos emplean como sustrato las fuentes de nitrógeno (N) y carbono (C) produciendo calor. Esta fase tiene una duración de 2 a 8 días.
2. Fase termófila: inicia a temperaturas superiores a los 45°C, los microorganismos mesófilos son sustituidos, en su mayoría por bacterias termófilas, que facilitan la degradación de celulosa y lignina (finalmente se degradarán por hongos). Se destruyen bacterias patógenas de origen fecal como *Salmonella spp* y *Escherichia*

coli. A temperaturas superiores a 55°C se eliminan los huevos de helmintos y quistes.

3. Fase de enfriamiento o mesófila II: una vez agotadas las fuentes de carbono y, en particular el nitrógeno, la temperatura disminuye a 45-40°C. En esta fase, se continúa con la degradación de la celulosa, y surgen algunos hongos.
4. Fase de maduración: etapa que dura meses a temperatura ambiente, en los cuales se generan reacciones de condensación y polimerización de compuestos carbonados para formar ácidos fúlvicos y húmicos.

La Figura 3-6 presenta el comportamiento de la temperatura, pH y oxígeno en las fases del proceso de composteo. Se aprecia la intervención de diversos microorganismos (en su mayoría bacterias), los cuales cambian acorde a la etapa. Los compuestos que se degradan primero son los azúcares, seguido de la hemicelulosa y de ceras.

Figura 3-6. Fases del composteo, tomada de Román *et al.*, 2013

3.5.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia consiste en la descomposición del material biodegradable en condiciones anóxicas para obtener principalmente biogás (en su mayoría CO₂ y CH₄) y el lodo estabilizado, llamado digestato (Agrowaste, n.d.).

3.5.2.1 Factores de importancia en la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se llevará a cabo apropiadamente o no con base a las condiciones que estén presentes en el medio. Los factores principales que intervienen en el proceso, son los siguientes (FAO, 2011):

- Naturaleza y composición del sustrato: se emplean residuos orgánicos de origen vegetal, agroindustrial y animal, entre otros. Estos residuos deben contener las siguientes propiedades bioquímicas: fuentes de carbono, nitrógeno y sales minerales en equilibrio para permitir el desarrollo y la actividad microbiana anaerobia.
- Relación C/N: son primordiales el contenido de carbono y el nitrógeno debido a que son las fuentes principales de alimentación de las bacterias metanogénicas, los valores óptimos van de 20:1 a 30:1.
- Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV): la materia orgánica está constituida de agua y ST. La movilidad de las bacterias metanogénicas en contacto con el sustrato disminuye conforme se incrementa el contenido de sólidos, lo cual puede perjudicar la eficiencia y producción de biogás. Los SV son una porción de ST que se volatilizan a 550°C, contienen componentes orgánicos que se convertirán en metano.

De acuerdo con el contenido de ST, existen dos clasificaciones de digestión anaerobia: seca $ST > 15\%$ y húmeda $ST \leq 15\%$.

- Temperatura: la temperatura a la cual operará el digestor se considera un parámetro importante, debido a su influencia en la velocidad de digestión anaerobia. Se tienen tres zonas de trabajo de acuerdo con la temperatura, las cuales son : psicrófila (5-20°C), mesófila (20-45°C) y termófila (45-70°C). Los intervalos de temperaturas óptimas para los microorganismos anaerobios son:
 - a) psicrófila 15-18 °C,
 - b) mesófila 25-35 °C y;
 - c) termófila 50-60 °C.

Sin embargo, la digestión anaerobia mesófila es la más empleada debido a sus bajos requerimientos energéticos y una mayor estabilidad del proceso (Gavala *et al.*, 2003).

- pH: óptimo entre 5.5-6.5 para acidogénicos y entre 7.8-8.2 para metanogénicos, mientras que para cultivos mixtos va de 6.8 a 7.4. Para que la digestión se realice adecuadamente, el pH no debe disminuir de 6 ni sobrepasar de 8.
- Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis: el proceso se inhibe por la existencia de compuestos tóxicos en el sistema, los cuales pueden estar contenidos en la materia prima que pueden estar presentes en forma de compuestos halogenados, fenoles, metales pesados y amoníaco, o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios tales como sulfuros (H_2S y HS^-), amoníaco (NH_3) y ácidos grasos de cadena larga (por ejemplo esteárico, palmítico y oleico) (Carbajal, 2013).

3.5.2.2 Etapas de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia comprende cuatro etapas (Figura 3-7): hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, las cuales se describen a continuación (Lorenzo-Acosta y Obaya-Abreu, 2005; FAO, 2011):

- a. Hidrólisis: es la conversión de los polímeros (carbohidratos, lípidos y proteínas) en sus respectivos monómeros (ácidos grasos de cadena larga, azúcares y aminoácidos). Este es el primer paso necesario para la degradación anaerobia, esta etapa depende de la temperatura y duración a la que se somete el proceso, la estructura bioquímica del sustrato (contenido de grasas, proteínas, lignina y carbohidratos), pH y tamaño de partícula.
- b. Acidogénesis: los compuestos orgánicos solubles generados en la hidrólisis se transforman, mediante acción microbiana, obteniendo hidrógeno, ácido acético y dióxido de carbono esencialmente, y en menor cantidad productos intermediarios: alcoholes y ácidos grasos volátiles, tales como propiónico, láctico y butírico, fundamentalmente.

En esta etapa el grupo de microorganismos presentes está constituido por bacterias facultativas y anaerobias estrictas, coloquialmente conocidas como bacterias productoras de ácidos (*Bacteroides*, *Bifidobacterium*, *Butyrvibrio*, *Clostridium*, *Enterobacterias*, *Lactobacillus*, *Propionbacterium*, *Ruminococos* y *Streptococos*) (González-Cabrera, 2014).

- c. Acetogénesis o acidogénesis intermediaria: En esta fase los productos correspondientes (ácidos grasos volátiles, etanol y algunos compuestos aromáticos) son convertidos en acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno, mediante bacterias acetogénicas.

Como ejemplos de bacterias acetogénicas se identifican *Syntrophomonas wolfei* que descompone el ácido butírico, o *Syntrophobacter wolinii*, que descompone el ácido propiónico. Además, se encuentran los géneros *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* y *Eubacterium* como bacterias pertenecientes al grupo de las acetogénicas (González-Cabrera, 2014).

- d. Metanogénesis: en esta etapa se produce el CH_4 principalmente del ácido acético o de mezclas de CO_2 y H_2 , también se puede generar a partir de metanol y ácido fórmico. Los microorganismos metanogénicos se clasifican en dos grupos de acuerdo con el sustrato que metabolizan: hidrogenotróficos, los cuales consumen

CO₂, H₂ y ácido fórmico; y acetoclásticos, que consumen metanol, acetato y algunas aminas.

La Figura 3-7 muestra un esquema de las etapas de la digestión anaerobia y la ruta principal para obtener metano.

Figura 3-7. Etapas de la digestión anaerobia, tomada de Aiyuk *et al.*, 2006

Cabe mencionar que en los últimos años, se ha hecho énfasis en obtener un digestato sanitariamente adecuado, con el fin de mitigar el efecto de los microorganismos patógenos (Luste y Luostarinen, 2010; Massé *et al.*, 2011). Por lo tanto, producir un digestato seguro para su futura aplicación en zonas agrícolas se ha vuelto tan importante como obtener altos rendimientos de metano.

3.6 Normatividad relacionada con lodos residuales

Los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales deben cumplir con las siguientes Normas Oficiales Mexicanas (NOM), la primera establece los límites permisibles de contaminantes en los lodos estabilizados para su aprovechamiento como mejoradores de suelos por lo que se debe asegurar la salud de la población, la segunda norma aplica cuando los lodos se lleven a relleno sanitario para su confinamiento:

- NOM-004-SEMARNAT-2002, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, esta norma se deberá cumplir cuando se empleen como mejoradores de suelo y se regulan elementos traza (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn y Hg) y microorganismos patógenos (*Salmonella spp.*, huevos de helmintos y coliformes fecales).
- NOM-083-SEMARNAT-2003, especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, se debe cumplir con esta norma cuando se manden a disponer en un relleno sanitario, para ello deben de tener un porcentaje de humedad menor al 85% y estar estabilizados.

Capítulo 4

ESTADO DEL ARTE

4 Estado del arte

En este capítulo, se presenta el estado del arte enfocado a los tratamientos de lodos por procesos de composteo y digestión anaerobia, así como una revisión de los tratamientos que se han aplicado para estabilizar los lodos de la PPTAR.

4.1 Estudios de caso de tratamientos de lodos residuales

La Tabla 4-1 presenta un resumen de los tratamientos de digestión anaerobia de lodos en co-digestión con residuos de jardinería y alimentos a temperaturas mesofílicas, en los cuales se eliminan patógenos y a su vez aumenta la producción de metano.

Tabla 4-1. Trabajos de estabilización de lodos mediante digestión anaerobia

Referencia	Título	Condiciones	Resultados
Julio-Guerrero <i>et al.</i> , 2016	Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos	Reactores de 300 mL a 35°C por 36 días. Usando LP (lodo primario), LSE (lodo secundario espesado) y RA (residuos de alimentos): LP30: RA70, LP50: RA50, LP70: RA30 y (LP+LSE)70: RA30.	La adición de residuos de alimentos propicia el aumento en la producción de metano. La cantidad de metano más alta fue de 0.02 LCH ₄ /gSV _{adicionado} para LP30: RA70
Appels <i>et al.</i> , 2008	Principios y potencial de la digestión anaerobia de lodos activados-residuos	Revisión de diversos modelos de la digestión anaerobia y evaluación de los factores de mayor importancia.	La digestión anaerobia reduce los sólidos en el lodo, además, destruye la mayoría de los patógenos presentes en el lodo.
Song <i>et al.</i> , 2004	La digestión anaerobia co-fase mesófila y termófila en comparación con la digestión mesófila y termófila en una sola etapa de lodos residuales	Digestión mesófila en una fase (12.2 L, 35±2°C, 1.43g _{vs} /L/d y 70 días). Digestión termófila en una fase (5 L, 55±2°C, 2.90g _{vs} /L/d y 70 días). Digestión anaerobia co-fase (termófila 55±2°C, mesófila 35±2°C, 115 días).	La digestión mesófila tuvo mejor rendimiento de metano (451±45 mL/gSV _{removidos}), calidad del efluente y estabilidad que la digestión termófila. La digestión anaerobia co-fase destruyó patógenos.
Sosnowski, <i>et al.</i> , 2003	Co-digestión anaerobia de lodos residuales y fracción orgánica de residuos sólidos municipales	Experimento I: Lodo primario y lodo activado (1:1). Experimento II: Lodo residual (75%) y fracción orgánica (25%). Experimento III: Fracción orgánica. Experimento IV: Digestión acidogénica, V _{reactor} 19 dm ³ y 56°C. Experimento V: Fermentación de metano, V _{reactor} 14 dm ³ y 36°C.	La adición de la fracción orgánica al lodo residual mejoró la relación C/N de 9:1 a 14:1. Los experimentos de dos etapas fueron más efectivos en condiciones termófilas (60% de metano).

La Tabla 4-2, muestra un resumen de diversos trabajos empleando el proceso de composteo, en el cual se inhiben los microorganismos patógenos y el producto final tiene buenas propiedades (índice de germinación, pH y conductividad).

Tabla 4-2. Trabajos de estabilización mediante composteo

Referencia	Título	Condiciones	Resultados
Fatunla et al., 2017	Influencia del composteo y el procesamiento térmico en la sobrevivencia de microorganismos patógenos y el estado nutricional del lodo residual de Nigeria	Mezcla de 35 kg de lodo con 47 kg de aserrín, con 57% de humedad y una relación C/N de aprox. 30:1 y aireación cada 3 días.	Eliminación de microorganismos patógenos, especialmente <i>Salmonella</i> y <i>Shigella</i> (no se detectaron en la composta final).
Nafez et al., 2015	Composteo de lodos residuales: evaluación de calidad para aplicaciones agrícolas	Ensayo A (lodos y residuos verdes) y B (lodos, hojas secas y residuos de jardín), se hicieron 3 relaciones diferentes 1:1 (A1, B1), 1:2 (A2, B2) y 1:3 (A3, B3).	Los productos finales de las pilas 1:2 y 1:3 tiene un índice de germinación alto, pH y conductividad eléctrica apropiados.
Vicente-Mendoza y Vigil-Sánchez, 2012	Evaluación fisicoquímica y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost	Se realizaron mezclas de lodos residuales (L), estopa de coco (E) y material vegetal (MV) con las siguientes proporciones: T1:L=70%,E=30% y MV=0% T2:L=60%, E=30% y MV=10% T3:L=50%, E=30% y MV=20% T4:L=40%, E=30% y MV=30%	Se logró cumplir con la normatividad vigente NCH2880-2003 en cuanto a <i>Salmonella</i> sp., <i>Shigella</i> sp., <i>Escherichia coli</i> ., protozoos y helmintos. La técnica de composteo redujo los coliformes fecales en un 99.29%.

4.2 Estudios de caso de tratamientos de los lodos generados en la PPTAR

En la Tabla 4-3 se presentan los tratamientos que se han efectuado a los lodos provenientes de PPTAR de la UAM-A. En un inicio se optó por una estabilización química del tipo alcalina, que inhibía los microorganismos patógenos y eliminaba los malos olores, pero con valores de pH superiores a 12 unidades, por lo cual, Echavarría-Acosta (2014) y García-García (2016), emplearon este biosólido en dos procesos biológicos (lombricomposteo y composteo, respectivamente) en ambos casos se logró disminuir el pH, en el primer caso se disminuyó a 9, mientras que, el composteo fue más efectivo alcanzándose un pH de 8.

Tabla 4-3. Tratamientos a los que se han sometido los lodos de la PPTAR

Referencia	Título	Condiciones	Resultados
García-García, 2016	Composteo de los lodos generados en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM-A	Se emplearon agentes acondicionantes: cisco de café, cítricos, mulch, residuos de jardinería y se mezclaron con los lodos estabilizados alcalinamente	El proceso de composteo es viable, se favorece el proceso usando residuos de jardinería y disminuyó el pH de 11.5 a 8.28
Echavarría-Acosta, 2014	Producción de abono orgánico a partir de lodos estabilizados provenientes de la PPTAR de la UAM-A	Se establecieron diferentes proporciones de biosólido y residuos de jardinería 1:3, 1:4 y 1:8 para garantizar la sobrevivencia de las lombrices, ya que se aplicó un vermicomposteo	Se disminuyó el pH de 11.11 ± 0.32 a 9.18 ± 0.03 . La relación 1:8 es la que mejores resultados presentó, con un índice de sobrevivencia de lombrices del 86.67%
Villegas-Ramos, 2009	Evaluación del proceso de estabilización-deshidratación de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAM-A	Se aplicaron 1.82 kg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{kg}_{\text{ST}}$ de lodos en base seca para realizar la estabilización alcalina y posteriormente se caracterizaron	Se observó que la estabilización alcalina eliminó patógenos y malos olores
Londoño-Montoya, 2008	Evaluación y estabilización de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAM-A	Se experimentó con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaOH. Se probaron 3 dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 0.344, 1.203 y 1.761 kg y 3 dosis de NaOH, 0.180, 0.541 y 0.901 kg	Se eligieron dos dosis medias de 1.2 kg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{kg}$ lodos y 0.541kg NaOH/kg lodo, para alcanzar pH's de 12.03 ± 0.52 y 11.77 ± 0.77 respectivamente

Capítulo 5

METODOLOGÍA

5 Metodología

Este proyecto se realizó en diferentes sitios de la UAM Azcapotzalco, cuarto de temperatura controlada (sótano) e invernadero (azotea) del Laboratorio del Área de Tecnologías Sustentables ubicado en el edificio W y en la zona de composteo ubicado detrás del edificio R. En la Figura 5-1 se muestra el diagrama general de la metodología empleada.

Figura 5-1. Metodología general empleada

5.1 Obtención de los lodos, residuos de jardinería e inóculo

La Figura 5-2 presenta la metodología empleada en el proceso de obtención de los lodos, cosustrato e inóculo.

Figura 5-2. Metodología de la obtención de los materiales para la digestión anaerobia

5.1.1 Lodos residuales

Los lodos se obtuvieron del sedimentador de mamparas paralelas de la PPTAR y son el acumulado de una semana laboral, se colocaron en tambos de 140 L para su traslado al laboratorio de tecnologías sustentables y se almacenaron a condiciones ambientales hasta el día del montaje.

5.1.2 Residuos de jardinería

El cosustrato (residuos de jardinería) se consiguió del centro de acopio de la unidad, se llenaron tambos 200 L para transportarlos al laboratorio (Figura 5-3).

Figura 5-3. Llenado y transporte de los residuos de jardinería

5.1.3 Inóculo

El estiércol de vaca se obtuvo de un establo cercano a la UAM-A (Figura 5-4), ubicado en prolongación avenida San Pablo 5, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México. Para facilitar su traslado se llenaron en cubetas y tambos.

Figura 5-4. Establo donde se obtuvo el inóculo

5.2 Caracterización inicial de los lodos, residuos de jardinería, inóculo y mezclas

Al inicio de la experimentación se caracterizaron los lodos, estiércol, residuos de jardinería y las mezclas de éstos; y al final del proceso, el digestato (proceso anaerobio) y la composta (proceso aerobio), mediante los parámetros y técnicas enlistados en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Parámetros fisicoquímicos y biológicos

Parámetro	Caracterización inicial lodos, sustratos y mezclas	Caracterización final compostas y digestatos	Técnica	Referencia
Humedad (%)	✓	✓	Técnica gravimétrica	SEMARNAT, 2002
pH (unidades)	✓	✓	Suspensión en agua 1:5	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005
Conductividad eléctrica (dS/m)	✓	✓	Suspensión en agua 1:5	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005
Materia orgánica (%)	✓	✓	Pérdida por calcinación a 650°C. Gravimétrico	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005
Carbón total (%)	✓	✓	Cálculo a partir de la materia orgánica	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005
Nitrógeno total (%)	✓	✓	Método AS-25	SEMARNAT, 2002
Relación C/N	✓	✓	NMX-AA-067-1985	DGN, 1992
Macronutrientes (N, P, K)	x	✓	KIT HANNA®	HANNA instruments, 2013
Fitotoxicidad (%)	x	✓	NADF-020-AMBT-2011	SEMARNAT, 2012
Elementos traza (mg/kg)	x	✓	NOM-004-SEMARNAT-2002	SEMARNAT, 2003
Coliformes fecales (NMP/g base seca)	✓	✓	NOM-004-SEMARNAT-2002	SEMARNAT, 2003
<i>Salmonella spp</i> (NMP/g _{base seca})	x	✓	NOM-004-SEMARNAT-2002	SEMARNAT, 2003
Huevos de helmintos viables (huevos de helmintos /g _{base seca})	x	✓	NOM-004-SEMARNAT-2002	SEMARNAT, 2003
Sólidos totales (%)	✓	✓	Cálculo a partir de la humedad	SEMARNAT, 2002
Sólidos volátiles (%)	✓	✓	Pérdida por calcinación a 550°C. Gravimétrico	Sadzawka <i>et al.</i> , 2005
Alcalinidad (mg/L)	✓	✓	Titulación potenciométrica	APHA 2320, 1992

5.3 Construcción de los reactores para digestión anaerobia

Para la digestión anaerobia se construyeron reactores (Figura 5-5), para ello se utilizaron recipientes de polietileno de alta densidad de 60 L con tapa de rosca. Se procedió al armado de los reactores, que consistió en colocar conectores rápidos, mangueras, válvulas y salvavidas que se acoplaron y constó de las siguientes partes:

- Puerto de muestreo: para extracción de muestras de biogás mediante una jeringa
- Salvavidas: para almacenar el biogás producido para su posterior cuantificación
- Llave de tres vías: para permitir el paso de nitrógeno y realizar la purga
- Agitador: constó de un sello hermético, para evitar fugas. La parte exterior se acopló al broquero de un taladro neumático
- Hélices: favorecieron la homogenización de las muestras. Hechos de acero inoxidable para evitar que la corrosión interfiriera en el proceso

Figura 5-5. Reactor para el proceso de digestión anaerobia

En la Tabla 5-2 se muestra el material que se empleó para la construcción de los reactores, así como sus especificaciones.

Tabla 5-2. Especificaciones del material empleado en los reactores

Material	Características	Imagen
Conector rápido	Zan-conexión, para manguera de 10 mm
Mangueras	Tubing Poliuretano, diámetro de 10 mm, color azul
Válvulas de tres vías	Polietileno con conexión de 6 mm de diámetro
Frasco	Vial de vidrio transparente con rosca para unir a manguera de 10 mm
Septa y anillo	Anillos de aluminio y septas de goma
Salvavidas	Salvavidas de plástico con sellado hermético
Silicón	Sellador elástico con base en silicón de curado acético
Agitadores	Agitadores tipo hélice de acero inoxidable
Taladro neumático	Taladro neumático 13 mm marca Stanley

5.4 Montaje del proceso de digestión anaerobia

La Tabla 5-3, muestra el diseño experimental empleado, con 4 tratamientos y 3 testigos (lodos, residuos de jardinería e inóculo). Las combinaciones tuvieron como propósito evaluar la eficiencia de cada sustrato y la interacción de éstos, mientras que, en los reactores sin inóculo fue el de evaluar si los sustratos por sí solos producían biogás en condiciones anaerobias.

Tabla 5-3. Diseño de experimentos de la digestión anaerobia

Tratamiento	Nomenclatura	Proporción [% volumen]	Réplicas
Lodos (testigo)	L100	100	2
Lodos + Residuos de jardinería	L50-RJ50	50:50	2
Residuos de jardinería (testigo)	RJ100	100	2
Lodo + Inóculo	L80-I20	80:20	2
Lodos + Residuos de jardinería + Inóculo	L40-RJ40-I20	40:40:20	2
Residuos de jardinería + Inóculo	RJ80-I20	80:20	2
Inóculo (testigo)	I100	100	2

La digestión se realizó, por duplicado, en reactores de plástico de 60 L de capacidad con sello hermético, con un volumen de trabajo de 45 L, a una temperatura de 30°C durante 63 días. Como inóculo se utilizó estiércol de vaca para garantizar la presencia de bacterias metanogénicas. En la Figura 5-6, se observan los reactores en el cuarto oscuro donde se llevó a cabo la experimentación.

Figura 5-6. Reactores anaerobios

5.4.1 Monitoreo del proceso de digestión anaerobia

Durante el tiempo de la digestión anaerobia (63 días) se realizó la caracterización y cuantificación de la producción del biogás.

5.4.1.1 Caracterización del biogás

La composición del biogás se analizó cada tercer día mediante cromatografía de gases empleando el equipo Agilent Technologies modelo 7890B, equipado con un detector frontal y un trasero (flujo de 20 mL/min, y una temperatura de 180°C), la temperatura del horno se mantiene a 50°C, el gas de arrastre es argón. Los gases que se cuantificaron fueron CO₂, O₂, CH₄, N₂, H₂ y CO. La Figura 5-7 muestra el proceso de la caracterización.

Figura 5-7. Diagrama del proceso de caracterización del biogás

5.4.1.2 Cuantificación del biogás

El biogás fue capturado en el salvavidas conectado al reactor, una vez lleno se procedía a medir la cantidad de biogás producido, mediante un sistema de desplazamiento con una solución salina ácida y el uso de una probeta graduada, (Figura 5-8).

Figura 5-8. Cuantificación del biogás

5.5 Montaje del proceso de composteo

Se montaron 8 pilas con un volumen aproximado de 500 L cada una, de acuerdo con el diseño experimental de la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Diseño experimental para el composteo

Tratamiento	Nomenclatura	Proporción [% volumen]	Réplica
Residuos de jardinería (testigo)	RJ	100	2
Lodos + Residuos de jardinería	L-RJ	20:80	2
Residuos de jardinería + Inóculo + Lodos	RJ-I-L	65:25:10	2
Residuos de jardinería + Inóculo	RJ-I	65:35	2

El composteo se realizó durante 66 días. A diferencia del tratamiento anaerobio se usaron otras relaciones debido a que la composición de los lodos es en gran parte líquida y el exceso de humedad puede provocar condiciones anaerobias, las cuales pueden retrasar el proceso. En la Figura 5-9 se muestra el procedimiento del montaje de las pilas de composta.

Figura 5-9. Metodología del montaje de las pilas de composta

5.5.1 Monitoreo del proceso de composteo

A lo largo del proceso de composteo se realizó el monitoreo de la humedad y temperatura, los cuales son importantes para determinar las etapas del proceso. La aireación se realizó manualmente (bieldos), diariamente durante los primeros quince días y posteriormente tres veces a la semana.

5.5.1.1 Temperatura

La medición de temperatura se realizó diariamente los primeros 15 días, posteriormente cada tercer día, en 5 puntos de las pilas, con un termómetro de vástago marca TEL-TRU Termometer con un intervalo de medición de 0-150°C y una exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$ (Figura 5-10).

Figura 5-10. Monitoreo de la temperatura en pilas de composta

5.5.1.2 Humedad

Este parámetro se monitorea cada que se realizaba la aireación manual mediante la técnica del puño cerrado, esta prueba consistió en tomar una muestra de la pila de composta, apretar y abrir la mano; el material debe de quedar unido sin escurrir agua, en caso de que escurra agua la pila debe airearse con mayor frecuencia, de lo contrario si el material queda suelto se debe agregar agua (Román *et al.*, 2013).

5.5.1.3 Aireación manual

La aireación se realizó por volteo manual con apoyo de bieldos y rastrillos, ésta consistió en dispersar las pilas de composta con la finalidad de garantizar que todo el material fuera aireado adecuadamente (Figura 5-11).

Figura 5-11. Aireación de las pilas de composta

Cuando se presentaron aglomerados se deshicieron para que se airearan correctamente y así evitar zonas anaerobias (Figura 5-12).

Figura 5-12. Aglomerados que se forman en las compostas

5.6 Tamizado de digestatos y compostas

Al finalizar la experimentación, una parte de los digestatos obtenidos de la digestión anaerobia se almacenó a 4°C para las pruebas microbiológicas. El resto se secaron a 65°C en charolas y se tamizaron con una malla del número 4 (4.75 mm de apertura) la parte que logró pasar el tamiz se utilizó para las pruebas de fitotoxicidad (Figura 5-13). Las muestras que no pasaron se guardaron a temperatura ambiente para la caracterización fisicoquímica.

Figura 5-13. Tamizado de los digestatos

Las compostas se tamizaron con una malla de tela de alambre, se eligió de esta manera debido a la cantidad de composta a tamizar (Figura 5-14). Una vez tamizadas, las muestras se conservaron de la misma manera que los digestatos.

Figura 5-14. Tamizado de las compostas

5.7 Caracterización de digestatos y compostas

A continuación, se describen las técnicas empleadas para caracterización fisicoquímica de los digestatos y las compostas, cabe señalar que en el caso de la digestión anaerobia se tienen más parámetros de control debido a la naturaleza del proceso (ST, SV y alcalinidad).

5.7.1 Parámetros fisicoquímicos

En este apartado se presentan las técnicas empleadas para la caracterización fisicoquímica de los productos finales obtenidos en ambos procesos.

5.7.1.1 Humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, materia orgánica, carbono y cenizas

El análisis se realizó en secuencia, debido a que todos ellos se determinaron por pérdida de material a diferentes temperaturas, se comenzó con la prueba de humedad y después los sólidos volátiles, materia orgánica y cenizas. En la Figura 5-15, se muestra cómo se realizaron las determinaciones anteriores. Las ecuaciones empleadas para los cálculos se pueden consultar en el anexo A.

Figura 5-15. Determinación de humedad, ST, SV, materia orgánica, C y cenizas

5.7.1.2 pH, conductividad y alcalinidad

Para todas las pruebas que se describen a continuación se utilizó el mismo extracto, en la Figura 5-16 se muestra la metodología empleada.

Figura 5-16. Técnica para las pruebas de pH, conductividad y alcalinidad

5.7.1.3 Nitrógeno

Esta prueba se dividió en tres etapas, la primera implicó la digestión de las muestras, en la segunda etapa se realizó la destilación de los digeridos y finalmente una titulación con H_2SO_4 . En la Figura 5-17 se presenta la metodología para la determinación de nitrógeno.

Figura 5-17. Metodología para nitrógeno total

5.7.1.4 Macronutrientes

Esta prueba es de tipo cualitativa para ello se empleó un kit HANNA®. Se realizó una extracción a partir de la cual se determinaron los contenidos de los siguientes macronutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio; para lo cual, los productos finales (composta y digestatos) fueron tamizados y secados.

- Extracción de los elementos

La Figura 5-18 describe los pasos a seguir para la obtención de la solución patrón.

Figura 5-18. Preparación de la solución extracto

Se emplearon diferentes volúmenes de la solución patrón para la determinación de cada macronutriente, se determinó el contenido de los macronutrientes con base a lo indicado por las tarjetas de cada elemento (trazas, bajo, medio y alto), las cuales incluye el kit HANNA®.

- Prueba de nitrógeno

La Figura 5-19 se muestra la metodología para analizar el contenido de nitrógeno.

Figura 5-19. Prueba de nitrógeno mediante kit HANNA®

- Prueba de fósforo

La Figura 5-20, describe como se analizó el contenido de fósforo.

Figura 5-20. Prueba de fósforo mediante kit HANNA®

- Prueba de potasio

La Figura 5-21, explica la técnica para el contenido de potasio.

Figura 5-21. Prueba de potasio mediante kit HANNA®

5.7.1.5 Elementos traza

En la Figura 5-22 se describe la técnica para obtener las muestras digeridas para la determinación de elementos traza con base en la NOM-004-SEMARNAT-2002. Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro de adsorción atómica marca PerkinElmer modelo PinAAcle 900F para la cuantificación de elementos traza de las compostas y digestatos (Al, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn).

Figura 5-22. Metodología para la digestión de muestras para absorción atómica

5.7.2 Parámetros microbiológicos

A continuación, se presentan las técnicas usadas para la cuantificación de tres tipos de microorganismos de importancia para la salud humana, los cuales son coliformes fecales, *Salmonella spp* y huevos de helmintos. Estas determinaciones se realizaron con base en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

5.7.2.1 Coliformes totales y fecales

- Prueba presuntiva

En la Figura 5-23 se describe la técnica de dilución para realizar la prueba presuntiva.

Figura 5-23. Obtención de las diluciones y prueba presuntiva

- Prueba confirmativa para coliformes totales

Una vez concluida la prueba presuntiva se procede a realizar las pruebas confirmativas para coliformes totales y fecales. En la Figura 5-24 se presenta la metodología para la prueba confirmativa de coliformes totales.

Figura 5-24. Técnica para la prueba confirmativa de coliformes totales

- Prueba confirmativa para coliformes fecales

En la Figura 5-25 se muestran los pasos a seguir para realizar la prueba confirmativa de coliformes fecales.

Figura 5-25. Técnica para la prueba presuntiva de coliformes fecales

Con base en la técnica de NMP se estableció el código con la cantidad de tubos positivos para cada prueba (coliformes totales y coliformes fecales), el código establecido se busca en tablas para conocer el valor del número más probable (NMP) que le corresponde (Castañeda-Briones, 2009). Una vez obtenido el valor que le corresponde a cada código, se procede a calcular el NMP/g_{ST}

- Coliformes totales y fecales

El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio que corresponda (BVB coliformes totales y EC para coliformes fecales). Finalmente se determina el NMP/g_{base seca}, para ello se utiliza la Ecuación 5-10 (anexo A).

5.7.2.2 *Salmonella spp.*

Esta técnica permite la cuantificación de *Salmonella spp.* mediante la técnica de tubos múltiples o número más probable (NMP). En la Figura 5-26, se describe la etapa de enriquecimiento.

Figura 5-26. Etapa de enriquecimiento

Posteriormente se realizó la prueba para contabilizar la presencia de *Salmonella* spp. (Figura 5-27).

Figura 5-27. Prueba para la cuantificación de *Salmonella* spp.

Los resultados de *Salmonella* spp. se expresan en NMP/g base seca, para ello se empleó la Ecuación 5-10 (anexo A).

El aislamiento y la identificación no son necesarios para la cuantificación de *Salmonella* spp., pero son imprescindibles como control, con el fin de asegurar que se realizó una correcta identificación. En la Figura 5-28 se describe la metodología empleada para la identificación.

Figura 5-28. Identificación y pruebas bioquímicas de *Salmonella* spp.

5.7.2.3 Huevos de helmintos

La Figura 5-29, muestra el procedimiento empleado para la determinación de los huevos de helmintos, para ello se pesó el equivalente a 4 g_{ST} de cada muestra y se homogeneizó con Tween 80, posteriormente se efectuaron diversos enjuagues.

Figura 5-29. Metodología para la determinación de huevos de helmintos

5.8 Pruebas de fitotoxicidad

Los lotes de semillas empleados fueron de la compañía Rancho Los Molinos de la línea Hortaflor, las pruebas de fitotoxicidad se realizaron en condiciones de invernadero, para ello se empleó una USB data Logger para monitorear la temperatura y humedad promedio, para el cumplimiento de los criterios establecidos por la OCDE, los cuales se presentan a continuación:

- Temperatura: $22^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$
- Humedad: $70\% \pm 25\%$

Esta prueba tuvo como objetivo determinar si los productos finales obtenidos (composta y digestato) son fitotóxicos. Se utilizaron semillas de girasol (*Helianthus annuus*) y cempaxúchitl (*Tagetes erecta*), la primera es una especie recomendada por la OCDE. Mientras que la especie de cempaxúchitl se eligió por ser una especie vegetal ornamental de importancia en México.

5.8.1 Viabilidad de las semillas según la OCDE

Esta prueba se realizó a los lotes de semillas que se emplearon. La importancia de esta prueba radica en comprobar la viabilidad de las semillas para asegurar un 70% de germinación (OECD, 2006). Se registró la temperatura del invernadero. En la Figura 5-30 se presenta la metodología para determinar el índice de germinación.

Figura 5-30. Prueba de viabilidad

5.8.2 Índice de germinación de acuerdo con la NADF-020-AMBT-2011

A diferencia de la prueba de viabilidad aquí hay una exposición con los productos finales para evaluar como éstos afectan a la germinación.

Esta prueba se realizó para las compostas y los digestatos con cada especie vegetal (girasol y cempaxúchitl), se tuvo un testigo por especie vegetal, éste tuvo como objetivo evaluar la germinación de las semillas en contacto con agua desionizada, para posteriormente determinar los cambios que producen los productos finales en las semillas. Las pruebas se realizaron por triplicado en cajas Petri con papel filtro (Figura 5-31).

Figura 5-31. Metodología para la prueba de índice de germinación en semillas

A continuación, se presentan las ecuaciones para la determinación del índice de germinación.

- Porcentaje de Germinación Relativa

$$PGR = \frac{\text{No. de semillas germinadas en el extracto}}{\text{No. de semillas germinadas en el testigo}} * 100 \dots \text{Ecuación 5-11}$$

- Crecimiento de Radícula Relativo

$$CRR = \frac{\text{elongación de radículas en el extracto}}{\text{elongación de radículas en el testigo}} * 100 \dots \text{Ecuación 5-12}$$

- Índice de germinación

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100} \dots \text{Ecuación 5-13}$$

De acuerdo con el criterio establecido por Emino y Warman, 2004 para la interpretación del índice de germinación se tiene:

Cuando el índice de germinación es menor al 50% indica alta fitotoxicidad del material evaluado, si se encuentra entre 50-80% se tiene moderada fitotoxicidad y finalmente si es mayor al 80% no se tiene fitotoxicidad.

5.8.3 Prueba de fitotoxicidad en plántulas según la OCDE

La prueba se realizó en condiciones de invernadero, para ello se emplearon los productos finales obtenidos de cada proceso y se agregaron a un suelo con bajo contenido de nutrientes, con una relación 20:80 respectivamente (Figura 5-32). Por lo que, el producto final ya sea composta o digestato se distribuyó como una capa de 5 cm de espesor en la parte superior donde crece la plántula.

Figura 5-32. Distribución del sustrato en los rizotrones

Esta prueba se efectuó por triplicado en rizotrones de vidrio de 5 cm de diámetro y 25 cm de altura, inclinados en un ángulo de 45°, con el objetivo de que las raíces crecieran sobre el vidrio y éstas se pudiesen visualizar. Además, los rizotrones se forraron con bolsas negras, para impedir el paso de la luz hacia las raíces y a su vez monitorear el crecimiento de la raíz. En la Figura 5-33, se detalla la metodología usada.

Figura 5-33. Metodología de toxicidad en plántulas

Los datos obtenidos en esta prueba se sometieron a un análisis estadístico, mediante el software Statgraphics Centurion XV. En la Figura 5-34, se muestran los análisis realizados.

Se procedió a realizar una prueba de Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov con la finalidad de evaluar si los datos son normales. Cuando los datos presentaban normalidad se realizó un ANOVA y cuando el valor p del ANOVA fue significativo, se procedió a realizar una prueba múltiple de rangos con el método de diferencias mínimas significativas.

En el caso de que los datos no presentaran normalidad, se utilizó una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis y si el valor p resultó significativo, se procedió a realizar un diagrama de caja de bigotes. Todas las pruebas se realizaron con un 95% de confianza.

Figura 5-34. Análisis estadísticos realizados

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6 Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de ambos procesos biológicos, así como su discusión.

6.1 Obtención de los lodos, residuos de jardinería e inóculo

Los sustratos se obtuvieron en la misma semana de acuerdo con descrito en el apartado 5.1, una vez recolectados se trasladaron al laboratorio para su almacenamiento, siendo los lodos los últimos en recolectar, ya que la PPTAR purga el sedimentador los viernes.

6.2 Digestión anaerobia

A continuación, se muestran los resultados de la producción de biogás, generación metano y la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los digestatos.

6.2.1 Construcción de reactores

En la Figura 6-1 se muestra la tapa de un reactor, con las uniones entre los conectores selladas con silicón. Además, se observa el diseño del agitador de hélice.

Figura 6-1. Tapa de los reactores

6.2.2 Montaje del proceso de digestión anaerobia

Se realizaron las mezclas de acuerdo con las proporciones establecidas en el diseño de experimentos. La Tabla 6-1 muestra las cantidades en volumen y masa de cada componente que se agregó a los reactores.

Tabla 6-1. Cantidades de componentes de cada reactor

Tratamiento	Residuos de jardinería [kg]	Estiércol [kg]	Lodos [L]	Agua [L]	Imagen
L100	-	-	45	-
L50+RJ50	3.5	-	35	-
RJ100	7.07	-	-	22
L80+I20	-	5.8	40	-
L40+RJ40+I20	2.4	7	24	10
RJ80+I20	3.6	9	-	13.8
I100	-	26	-	-

6.2.3 Caracterización de los lodos, residuos de jardinería, inóculo y de las mezclas sometidas a digestión

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de las muestras sometidas al proceso de digestión.

6.2.3.1 Parámetros fisicoquímicos

La Tabla 6-2 muestra los resultados de las caracterizaciones iniciales de los lodos, residuos de jardinería y el inóculo (testigos), así como de las mezclas que se propusieron en el diseño experimental. La humedad presentó variaciones entre un 73 y 98%, siendo los más húmedos los lodos, porque su composición es prácticamente líquida, mientras que los residuos de jardinería (RJ100) y jardinería e inóculo (RJ80-I20) presentaron 73% de humedad, debido a que los residuos de jardinería son más secos.

En la literatura se reporta que el proceso de digestión anaerobia es más estable con una relación C/N entre 20:1-30:1, lo cual se cumplió en los casos de L80-I20, L40-RJ40-I20, RJ80-I20 (Siddique y Wahid, 2018). Los reactores que no cumplieron con esta relación fueron L100, RJ100, L50-RJ50 y RJ80-I20, para el caso de los lodos se ha reportado que una baja relación C/N reduce la actividad microbiana (FAO, 2011). Para el caso de los tratamientos con relaciones C/N superiores a lo recomendado se generan grandes cantidades de ácidos grasos volátiles (Siddique y Wahid, 2018).

Tabla 6-2. Caracterización fisicoquímica al inicio del proceso de digestión anaerobia

Parámetro	Muestras						
	L-100	I-100	RJ-100	L50-RJ50	L80-I20	L40-RJ40-I20	RJ80-I20
Humedad [%]	98.7±0.02	80.1±0.4	72.9±3.4	83.9±0.9	97.4±0.2	87.8±1.4	73.3±0.7
Sólidos totales [%]	1.3±0.02	19.9±0.4	27.1±3.4	16.02±1	2.6±0.2	12.2±1.4	26.7±0.7
Sólidos volátiles* [%]	45.8±0.1	80.8±0.7	88.2±0.2	87.4±0.4	86.5±1.2	83.4±1.2	86.9±2.2
Cenizas* [%]	48.3±1.4	16.7±0.6	10.2±0.2	10.4±0.9	29.4±3.5	14.6±1	10.9±1.8
Materia orgánica* [%]	49.2±0.9	81.8±0.4	89.6±1.5	88.8±0.6	67.6±2.8	84.4±1.3	88.8±0.8
Carbono total* [%]	28.6±0.5	47.4±0.2	51.9±0.9	51.5±0.4	39.24±1.6	48.9±0.8	51.5±0.5
Nitrógeno total* [%]	3.8±0.5	1.8±0.09	1.3±0.2	1.4±0.1	1.9±0.2	1.7±0.0	1.6±0.03
C/N*	7.6±0.9	25.6±1.3	35±0.02	35.9±3.3	20.9±2.3	29.6±1.3	31.5±0.2
Alcalinidad [mgCaCO ₃ /kg]	49.3±4.5	1633.5±145.7	573.9±63.4	429±23.3	181.9±2.5	709.5±23	798.1±30.7
pH	6.3±0.01	8.01±0.09	7±0.02	7.5±0.2	7±0.05	7.6±0.05	7.8±0.1
Conductividad eléctrica [dS/m]	2.7±0.04	2.4±0.07	0.9±0.01	0.7±0.1	5.2±0.08	1.5±0.03	1.36±0.03

*Porcentaje en base seca

La mezcla de los lodos con los residuos de jardinería e inóculo (L40-RJ40-I20) en las proporciones establecidas favorecieron algunas propiedades para realizar la co-digestión, tales como relación C/N, sólidos totales, materia orgánica, pH y alcalinidad en contraste a la digestión individual, esto se debe a que la combinación de las materias primas complementa sus propiedades fisicoquímicas, al tener una mejor disponibilidad y equilibrio de macro y micronutrientes (para un adecuado crecimiento microbiano), dilución de compuestos tóxicos o inhibidores, balance de sólidos y una mejor capacidad de amortiguación de la mezcla (Tyagi *et al.*, 2018).

Se puede observar que los lodos por sí solos (L100) no cuentan con las condiciones idóneas para un adecuado proceso de digestión anaerobia (relación C/N). De acuerdo con Zhang y colaboradores (2015), el exceso de nitrógeno y la insuficiencia de carbono propician una dieta desequilibrada para los microorganismos, lo cual puede propiciar una acumulación de amoníaco y por consiguiente una inhibición microbiana.

Se tienen alcalinidades entre 49-1633 mgCaCO₃/kg, los cuales difieren debido a la naturaleza de los sustratos, las co-digestiones de los lodos con residuos de jardinería e inóculo aumentaron este parámetro.

En cuanto a la conductividad esta varió entre 0.9 a 2.7 dS/m, las cuales son menores a 15 dS/m, lo que garantiza una apropiada operación del digestor y que no existan problemas de inhibición por altas concentraciones de sales (Hernández-Martínez, 2010).

6.2.3.2 Parámetros microbiológicos iniciales

La Tabla 6-3, muestra los resultados de la presencia de coliformes totales y fecales para cada tratamiento al inicio del proceso. La mezcla de lodos con inóculo (L80-I20) tiene la mayor cantidad de coliformes totales, seguido del reactor que contiene lodos, jardinería y estiércol (L40-RJ40-I20). En cuanto a coliformes fecales el reactor L80-I20 tiene la mayor concentración.

Tabla 6-3. Caracterización microbiológica inicial

Parámetro	Muestras						
	L-100	I-100	RJ-100	L50-RJ50	L80-I20	L40-RJ40-I20	RJ80-I20
Coliformes totales [NMP/g _{ST}]	3.4x10 ⁶	1.6x10 ⁹	8.2x10 ⁷	7.4x10 ⁶	7.5x10 ⁹	1.8x10 ⁹	5.9x10 ⁸
Coliformes fecales [NMP/g _{ST}]	6.8x10 ⁵	1.6x10 ⁹	5.8x10 ⁶	1.1x10 ⁵	4.8x10 ⁹	9.7x10 ⁸	9.7x10 ⁸

6.2.4 Caracterización del biogás

En la Figura 6-2, se presenta el porcentaje de metano para cada reactor, donde la mayor producción la tuvo la co-digestión de RJ80-I20, seguido del reactor L80-I20 y finalmente el reactor L40-RJ40-I20 alcanzando un 65%, 63% y 57%

respectivamente. Estos reactores, cumplen con el porcentaje recomendado de metano, ya que el biogás para ser inflamable debe contener un porcentaje de metano superior al 45% (FAO, 2011). Se puede apreciar que las combinaciones con alto contenido de lodos presentaron altos porcentajes de metano lo que es bueno ya que permite el tratamiento de estos residuos y la obtención de metano que puede ser aprovechado energéticamente.

Figura 6-2. Generación de metano

Se han tenido resultados similares por Sosnowski y colaboradores en 2003, en la co-digestión de lodos residuales y la fracción orgánica de los residuos sólidos, en la proporción 75:25 mejoró notablemente la generación de biogás y se logró una producción superior al 70% de metano.

La Tabla 6-4 presenta los rendimientos de producción de metano para cada tratamiento, teniendo los mejores rendimientos los tratamientos L80-I20 seguido de L40-RJ40-I20 (9.5 y 2.2 mLCH₄/g_{SV}), mientras que L100 no generó metano. Se demuestra que los lodos de origen fisicoquímico pueden ser aprovechados en la generación de metano, ya que el mejor rendimiento se obtuvo en la mezcla L80-I20, siendo el tratamiento en el que se puede tratar la mayor cantidad de lodos.

Tabla 6-4. Generación de metano en los tratamientos de digestión anaerobia

Tratamiento	mmol CH ₄ /g _{ST}	mLCH ₄ /g _{ST}	mLCH ₄ /g _{SV}
L80-I20	0.255	8.2	9.5
RJ100	0.038	1.2	1.3
L40-RJ40-I20	0.057	1.8	2.2
I100	0.034	1.1	1.4
L50-RJ50	0.046	1.5	1.7
RJ80-I20	0.050	1.4	1.6

NOTA: Para realizar la conversión de mmol a mL se consideraron las siguientes condiciones: presión de la Ciudad de México 0.77 atm y temperatura de operación 303.15 K.

La co-digestión permitió efectos sinérgicos positivos en la producción de metano, debido a que las mezclas aumentaron el material biodegradable disponible y la diversidad microbiana (el estiércol de vaca, usado como inóculo contiene microorganismos metanogénicos). Sin embargo, el empleo de los residuos de jardinería no es esencial para lograr obtener altos rendimientos en el tratamiento de los lodos fisicoquímicos, pero estos logran mejorar las condiciones para una adecuada digestión.

6.2.5 Cuantificación del biogás

El volumen producido de biogás fue mayor en el reactor constituido por jardinería y estiércol (RJ80-I20) con 294 L, seguido de los reactores de jardinería con lodos (L50-RJ50) y lodos con estiércol (L80-I20), produciendo 32 y 30.42 litros respectivamente. Mientras que, el reactor L100 no generó biogás. La diferencia de producción de biogás se puede deber a la variación de la proporción de los sustratos en las mezclas y a la composición de éstos (Figura 6-3).

Figura 6-3. Producción de biogás

En la Tabla 6-5 se presentan algunos estudios de co-digestión con diferentes lodos y sustratos, se describen las condiciones de trabajo y los resultados obtenidos, para compararlos con los que se obtuvieron en este trabajo.

Tabla 6-5. Comparación de la producción de metano empleando lodos residuales

Referencia	Sustratos	Condiciones	Producción de CH ₄
Sarabia <i>et al.</i> , 2017	Excretas de borrego (sustrato), lodos de aguas residuales y rumen (cosustratos)	Temperatura promedio de 27°C, agitación diaria a 900 rpm durante 20 min, volumen de trabajo de 800 mL. Se trabajó con 10% SV (9% SV del sustrato y 1% SV de cosustrato)	Tratamiento 1 (excretas de borrego-lodos) 64.2% y 283.8 mLCH ₄ /g ^{SV} adicionado Tratamiento 2 (excretas de borrego-rumen) 64.2% y 323.8 mLCH ₄ /g ^{SV} adicionado Tratamiento 3 (excretas de borrego) 61.12% y 354.6 mLCH ₄ /g ^{SV} adicionado
Julio <i>et al.</i> , 2016	Lodos primarios (LP), lodos secundarios espesados (LSE), residuos de alimentos (RA) e inóculo de digestor anaerobio	Temperatura promedio de 35°C, agitación manual 2 veces al día, volumen de trabajo de 300 mL	LP30:RA70 250 mL/g ^{SV} adicionado LP50:RA50 220 mL/g ^{SV} adicionado LP70:RA30 210 mL/g ^{SV} adicionado LP-LSE70:RA30 220mL/g ^{SV} adicionado
Fernández <i>et al.</i> , 2008	Fracción orgánica de los residuos sólidos y lodo mesofílico de una PTAR	Temperatura promedio de 35°C, agitación continua, volumen de trabajo 1.7 L. Para ambos casos se agregó 3.64 % de ST de lodo	Reactor 1 (cargado con 20 % _{ST}) 80% CH ₄ y 110 mL/g ^{SVr} Reactor 2 (cargado con 30 % _{ST}) 90% CH ₄ y 70 mL/g ^{SVr}
Murto <i>et al.</i> , 2004	Lodo primario, lodo activado, y residuos industriales de alimentos (ricos en almidón)	Temperatura promedio de 35°C, agitación diaria, volumen de trabajo 500 mL	Los rendimientos de biogás fueron de 600 mL/g ^{SV} , para los tres reactores
Este trabajo	Lodos fisicoquímicos, residuos de jardinería (hojarasca) y estiércol de vaca	Temperatura promedio de 30°C con agitación manual diaria por 1 min, volumen de trabajo 45 L	RJ80-I20 65% y 1.6 mL/g ^{SV} adicionado L80-I20 63% y 9.5 mL/g ^{SV} adicionado L40-RJ40-I20 57% y 2.2 mL/g ^{SV} adicionado

Se obtuvo un porcentaje promedio de metano del 62%, el cual es un porcentaje cercano a los obtenidos por Sarabia y colaboradores (2017) y que resulta ser bueno para lograr una buena combustión del biogás. Sin embargo, en cuanto a rendimiento, está por debajo de lo reportado en los trabajos mostrados, esto puede ser debido al tipo de lodo, ya que para este trabajo se emplearon lodos de un proceso fisicoquímico, los cuales son menos empleados en la digestión anaerobia debido a que contienen coagulantes y estos pueden ser posibles inhibidores.

6.2.6 Caracterización de los digestatos

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de los digestatos obtenidos.

6.2.6.1 Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-6, se muestran los resultados de la caracterización de los digestatos obtenidos en cada tratamiento. Los porcentajes de humedad permanecieron

constantes debido a la hermeticidad del proceso, mientras que, en los sólidos totales se presentaron valores en el intervalo de 1.3 a 31.9% debido a la propia naturaleza de cada sustrato. Para el caso de los volátiles, el menor contenido se reportó en el tratamiento L-100 con 49.9% y el mayor fue de 87.8% en el reactor L50-RJ50. En cuanto al contenido de materia orgánica, éste se encuentra entre un 80% con excepción de los lodos 51.7%.

Tabla 6-6. Caracterización fisicoquímica de los digestatos obtenidos

Parámetro	Muestras						
	L-100	I-100	RJ-100	L50-RJ50	L80-I20	L40-RJ40-I20	RJ80-I20
Humedad [%]	98.7±0.2	79±3.7	68.08±0.1	88.9±0.9	96.2±0.4	88.8±0.7	78.6±3.1
Sólidos Totales [%]	1.3±0.2	21±3.6	31.9±0.1	11.04±0.9	3.8±0.4	11.1±0.7	21.4±3.1
Sólidos Volátiles* [%]	49.9±0.3	78.6±1.4	80.3±1.3	87.8±0.6	84.2±0.8	85.2±2.4	77.02±1.5
Cenizas* [%]	48.06±6.9	18.8±1.3	16.9±1.4	10.6±0.5	13.5±1.2	13.5±2.6	20.4±1.4
Materia Orgánica* [%]	51.7±0.3	79.3±1.4	82.6±1.4	88.9±0.5	85.3±0.4	85.9±2.5	78.7±1.5
Carbono total* [%]	30±0.2	45.9±0.8	47.9±0.8	51.6±0.3	49.5±0.2	49.8±1.5	45.7±0.8
Nitrógeno total* [%]	4.3±0.0	2.03±0.28	0.9±0.2	1.3±0.03	1.2±0.1	1.1±0.1	1.1±0.1
C/N*	7.03±0.04	23.1±3.2	49.7±8.7	38.1±0.9	40.7±4.1	43.6±4.9	41.2±2.9
Alcalinidad [mgCaCO ₃ /kg]	172.6±4.7	2623.2±252.3	593.6±35.04	494.6±34.9	665.3±72	940.4±126.2	1321.5±207.6
pH	7±0.03	7.5±0.1	7.3±0.02	7.3±0.02	7.8±0.1	7.6±0.05	8.1±0.01
Conductividad eléctrica [dS/m]	2.8±0.06	4.8±0.4	0.7±0.01	0.7±0.04	1.05±0.08	1.29±0.03	1.6±0.07

*Porcentaje en base seca

Con base en la revisión publicada por Nkoa en el 2014, los valores de los digestatos están dentro de los intervalos establecidos de materia orgánica (38.6–75.4), sólidos totales (1.5–45.7) nitrógeno total (0.12–1.5), pH (7.3–9) y relación C/N (2:1–25:1), estos datos fueron obtenidos de diversos procesos de co-digestión con diferentes materias primas (residuos agrícolas, estiércol de ganado, lodos de aguas residuales, residuos sólidos orgánicos, entre otras). En algunos casos se tiene valores mayores, debido a que no se usaron los mismos cosustratos y proporciones.

Las relaciones C/N mayores a 25, son resultado de un contenido alto de residuos ricos en lignocelulosa, por lo cual este tipo de residuos requieren de un mayor

tiempo de retención o un pretratamiento para facilitar su biodegradación (Siddique y Wahid, 2018).

En la Tabla 6-7, se presentan las concentraciones de metales en los digestatos y el límite permisible para una calidad excelente. En su mayoría los digestatos cumplen con la NOM-004-SEMARNAT-2002 para un aprovechamiento en: usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación, uso agrícola, forestal y mejorador de suelos, con excepción del tratamiento L100 para cadmio, esto puede deberse a que el agua residual proveniente del edificio L, tiene descargas de esmaltes, pigmentos y algunas soldaduras, los cuales pueden contener este metal.

De acuerdo con Rivera y colaboradores (2016) en un pH menor de 4.7 predomina el Al_3^+ ; entre 4.7 y 6.5 el $Al(OH)_2^+$ y entre 6.5 y 8 el aluminio insoluble ($Al(OH)_3$), por lo tanto para el caso de los biosólidos obtenidos en ambos procesos el aluminio presente en estos puede estar en forma insoluble, lo cual significa que no está en una forma química asimilable o dañina para el crecimiento y desarrollo de plantas.

Tabla 6-7. Concentración de metales en los digestatos

Digestato	Concentración [mg/ kg]						
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni	pH
L-100	199±0.2	146±1.1	153.5±34	184.2±5	498±14	141±4	7
I-100	22±0.1	26±2	94±9	37.6±0.6	190±29	68±3	7.5
RJ-100	11.5±0.1	25±4	58.7±14	111.7±31	97.2±6	24±5	7.3
L50-RJ50	11.7±0.1	11.5±0.1	29.9±3	22.1±0.3	70.3±9	29±3	7.3
L80-I20	11.2±0.3	13.8±0.3	129±68	17±6	105.3±7	36±12	7.8
L40-RJ40-I20	12.2±0.5	18.6±3.1	23±4	75±33	38.5±29	33±4	7.6
RJ80-I20	11.1±0.1	25±12	40±3.03	129±118	107.4±2	34±11	8.1
Límite de la NOM 004	39	1200	1500	300	2800	420	* N. E.

*N.E. No especificado

En la Tabla 6-8 se muestran los macronutrientes de fácil disponibilidad para las plantas, en valores cualitativos, de cada digestato obtenido (previamente secados y tamizados), el contenido de nutrientes presentes varía de acuerdo con los sustratos utilizados. El nitrógeno en forma de nitratos, en su mayoría se encuentra en trazas, mientras que, fósforo y potasio entre trazas y medio, lo cual puede hacer favorable la presencia de estos nutrientes para el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales.

Tabla 6-8. Contenido de macronutrientes en los digestatos

Reactor	Macronutriente		
	Nitrógeno (NO ₃)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potasio (K ₂ O)
L100	trazas	medio	bajo
I100	trazas	trazas	medio
RJ100	trazas	medio	medio
L50-RJ50	trazas	medio	medio
L80-I20	trazas	bajo	medio
L40-RJ40-I20	trazas	bajo	trazas
RJ80-I20	trazas	trazas	medio

El contenido óptimo de estos dependerá de la especie vegetal a cultivar y tipo de suelo al que se añadirá el digestato. Además, existen diferentes composiciones dependiendo del tratamiento (drenado, secado, separación) al que se haya sometido el digestato. Por consiguiente, en una separación entre las fracciones líquida y sólida del digestato, es más probable que la fracción líquida contenga amonio (NH₄) y potasio (K₂O), mientras que la fracción sólida contenga fosfato (P₂O₅) y materia orgánica (Wilken *et al.*, 2018).

6.2.6.2 Parámetros microbiológicos

En la Tabla 6-9, se presenta la cantidad de coliformes totales, fecales y *Salmonella spp.* presentes en los digestatos, en el caso de ambos tipos de coliformes, éstos disminuyeron con una eficiencia entre 86-99% en la mayoría de los tratamientos, con excepción del digestato L100, ya que en coliformes totales tuvieron una eficiencia muy baja del 2.5% y en coliformes fecales 55%. A pesar de lo anterior se cumplió con el límite permisible de <2x10⁶ NMP/g_{ST} para coliformes fecales, lo cual le corresponde una clase C (aprovechamiento en usos forestales, mejoramientos de suelos y usos agrícolas) establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Para huevos de helmintos se cumplió con el límite máximo permisible de <10 huevos de helmintos/g_{ST} para una clase B (usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación, aprovechamiento en usos forestales, mejoramientos de suelos y usos agrícolas).

En cuanto a *Salmonella spp.* los digestatos no cumplen con la normatividad, ya que ésta tiene un límite máximo permisible de <300 NMP en 4 g_{ST} para un biosólido clase C, esto puede deberse a las condiciones mesofílicas en las que desarrolló el proceso, por lo que se recomienda un tren de tratamiento para mejorar este parámetro.

Tabla 6-9. Caracterización microbiológica final de los digestatos

Parámetro	Muestras							Límite NOM 004	Clase
	L-100	I-100	RJ-100	L50- RJ50	L80-I20	L40-RJ40- I20	RJ80- I20		
Coliformes totales [NMP/g _{ST}]	3.3x10 ⁶ ± 3x10 ⁶	5.7x10 ³ ± 9x10 ²	1.6x10 ⁴ ± 1x10 ⁴	1.9x10 ⁴ ± 2x10 ³	1.9x10 ⁶ ± 2x10 ⁶	5.3x10 ⁴ ± 2x10 ⁴	3.7x10 ⁴ ± 2x10 ⁴	-	N. E.*
Coliformes fecales [NMP/g _{ST}]	3x10 ⁵ ± 1.8x10 ⁵	1.3x10 ³ ± 0	9x10 ³ ± 5x10 ³	1.5x10 ⁴ ± 6x10 ³	2.7x10 ⁵ ± 2x10 ⁵	7.8x10 ³ ± 6x10 ³	5.4x10 ³ ± 4x10 ³	<2x10 ⁶	C
<i>Salmonella</i> <i>spp.</i> [NMP/g _{ST}]	3x10 ² ±0	1.3x10 ⁴ ± 1x10 ⁴	3.5x10 ⁴ ± 1x10 ⁴	2.4x10 ⁵ ± 0	1.2x10 ⁵ ± 1x10 ⁵	1.2x10 ⁵ ± 1x10 ⁵	1.8x10 ⁴ ± 6x10 ³	<300	N. C.**
Huevos de helminthos viables	7.5±0.5	8± 5	2.5± 0.5	3± 0	0.5± 0.5	0± 0	4± 1	<10	B

N. E.* No especificado, N. C.** No cumple

Datos obtenidos por Manyi-Loh y colaboradores en 2014, indican que los microorganismos patógenos de importancia para la salud se reducen en un 90%-99%, esta reducción está en función de los días de la digestión, *Campylobacter sp.*(18 días) < *Escherichia coli sp.*(62 días) < *Salmonella spp.*(133 días), las diferentes tasas de supervivencia pueden verse influidas por las características propias de cada bacteria, los nutrientes disponibles y las etapas del proceso de digestión anaerobia.

Rojas y colaboradores (2000), concluyen que una mayor remoción de microorganismos patógenos puede lograrse mediante la vía termófila, a 55°C, condición en la cual los patógenos son eliminados en un tiempo promedio de 10 días, disminuyendo los riesgos a la salud y así emplear el digestato de acuerdo con la normatividad vigente, ya que en esta se establecen los posibles usos de acuerdo con su contenido de microorganismos y metales.

En general se logró disminuir la carga de microorganismos patógenos, sin embargo, se requiere aumentar el tiempo de la digestión anaerobia y/o realizar un proceso adicional para lograr estabilizar *Salmonella spp.* y así cumplir con la legislación vigente (NOM-004-SEMARNAT-2002).

6.3 Composteo

En este capítulo se presentan los resultados del monitoreo de la temperatura y las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas al inicio y término del proceso de composteo. El composteo tuvo una duración de 66 días. La Figura 6-4 se observa la disminución del tamaño de las pilas de composta, en el inciso a) se tiene una pila al inicio del proceso y en el inciso b) al término de éste.

Figura 6-4. Pilas de composta a) inicio y b) final del composteo

6.3.1 Caracterización inicial de las mezclas empleadas en el composteo

A continuación, se presentan los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas realizadas al inicio y término del composteo.

6.3.1.1 Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-10, se presentan las características fisicoquímicas de las mezclas de los sustratos al inicio del proceso. La humedad de las compostas varió desde 63.1% la más baja, correspondiente a la pila de residuos de jardinería (RJ); mientras que, la más alta fue de 66.5% del tratamiento de residuos de jardinería más estiércol de vaca (RJ-I). Con base en lo anterior, los procesos de composteo cumplieron con la humedad óptima para el adecuado crecimiento de los microorganismos, la cual está entre el 50-70% (Bueno-Márquez *et al.*, 2008).

Tabla 6-10. Caracterización fisicoquímica inicial del proceso de composteo

Parámetro	Tratamiento			
	RJ	RJ-L	RJ-L-I	RJ-I
Humedad [%]	63.1±2.6	64.4±3.4	64.24±0.4	66.5±0.5
Materia Orgánica* [%]	79.5±2.4	72.5±4.7	61.54±3.6	70.3±1.7
Carbono total* [%]	46.1±1.4	42.07±2.7	35.75±2.06	40.8±0.9
Nitrógeno total* [%]	1.04±0.04	1.3±0.01	1.64±0.05	1.6±0.4
C/N*	44.6±2.5	31.5±2.02	21.74±1.5	23.2±0.2
pH	6.3±0.08	6.5±0.1	7.64±0.03	7.7±0.01
Conductividad eléctrica [dS/m]	1.1±0.016	1.08±0.06	1.17±0.05	1.3±0.007
Cenizas* [%]	19.4±2.3	26.9±4.6	38.07±3.5	29.1±1.7

*Porcentaje en base seca

En general, los tratamientos estuvieron por arriba del porcentaje de carbono recomendado de 25-35%, debido a que el residuo predominante fue jardinería, rico en materia carbonosa (Bueno-Márquez *et al.*, 2008).

En cuanto a la relación C/N, los tratamientos RJ-L, RJ-L-I y RJ-I estuvieron en el intervalo recomendado de 15:1-35:1 (Román *et al.*, 2013). Mientras que el caso de RJ, la relación C/N fue de 44.6:1, esto fue consecuencia del alto contenido de carbono y un bajo porcentaje de nitrógeno, lo cual no logró compensar esta relación.

De acuerdo con Román y colaboradores (2013), el intervalo óptimo del pH se encuentra entre 5.8 y 7.2, el pH más bajo fue 6.3 de RJ y el más alto de 7.7 de RJ-I, estas diferencias se deben a la diferente composición de cada pila.

La conductividad eléctrica inicial en las pilas osciló entre 1-1.3, por lo que éstas resultaron ser ligeramente salinas, lo cual no afecta al proceso de composteo. En cuanto al porcentaje de cenizas, estas corresponden al contenido de compuestos inorgánicos (sales minerales), los cuales variaron entre 19 a 38%.

En la caracterización inicial, se demuestra que el adicionar los lodos no afectó negativamente las características fisicoquímicas idóneas para un proceso de composteo, sino por el contrario se complementó la relación C/N.

6.3.1.2 Parámetros microbiológicos

Los microorganismos indicadores analizados fueron: *Salmonella spp.*, coliformes totales, coliformes fecales y huevos de helminto. En la Figura 6-5, se muestran tubos positivos para las pruebas confirmativas iniciales de coliformes totales y fecales.

Figura 6-5. Tubos positivos para coliformes totales (izquierda) y coliformes fecales (derecha)

La Tabla 6-11 muestra los resultados con respecto a la concentración de coliformes totales y fecales. La cantidad de coliformes fue mayor en las mezclas, siendo la más alta para ambos casos la mezcla de residuos de jardinería, lodos y estiércol (RJ-L-I). Por el contrario, la pila de residuos de jardinería (RJ) fue la que menor cantidad de coliformes presentó. El incremento de los coliformes en las mezclas puede deberse a la interacción de los sustratos (lodos y estiércol de vaca).

Tabla 6-11. Caracterización microbiológica inicial del proceso de composteo

Parámetro	Tratamiento			
	RJ	RJ-L	RJ-L-I	RJ-I
Coliformes totales [NMP/g _{ST}]	1.27×10^5	1.32×10^5	4.19×10^7	1.36×10^6
Coliformes fecales [NMP/g _{ST}]	2.54×10^4	5.26×10^4	3.4×10^5	2.23×10^5

6.3.2 Temperatura

En la Figura 6-6 se muestra el comportamiento de la temperatura en las pilas de composta, se observan las etapas del composteo, donde la fase de mayor importancia es la termófila, debido a que en ésta se lleva a cabo la higienización a una temperatura de 55°C en toda la pila por lo menos durante 3 días (Wichuk y McCartney, 2007). La fase termófila se presentó a partir del día cuatro, teniendo una duración de aproximadamente cuatro días, para posteriormente dar a lugar a las fases mesófila y de madurez, encontrando las etapas características del proceso.

Figura 6-6. Comportamiento de la temperatura en el composteo

En la etapa termófila las pilas alcanzaron temperaturas superiores a los 45°C. Las compostas RJ100 y L20+RJ80, tuvieron una temperatura máxima de 60°C, esto se debió a que tuvieron una mayor composición de residuos de jardinería, por lo que se tuvo un mayor volumen, lo cual implica una mayor porosidad que propicio una mejor aireación favoreciendo que se alcanzaran y mantuvieran altas temperaturas apropiadas para la disminución de patógenos. Mientras que las pilas RJ65+I25+L10 y RJ65+I35 alcanzaron 49°C y 52°C, respectivamente, éstas no lograron las temperaturas óptimas para una adecuada higienización. Por lo que debe ajustarse el volumen de éstas para lograr tener las pilas por más tiempo en la etapa termófila y mejorar con ello el proceso, esto se puede constatar en la Tabla 6.15, donde el contenido de coliformes y *Salmonella spp* es mayor para las compostas obtenidas de estas pilas.

6.3.3 Caracterización de las compostas

A continuación, se presentan los resultados de las caracterizaciones realizadas a las compostas obtenidas.

6.3.3.1 Parámetros fisicoquímicos

La Tabla 6-12, presenta la caracterización fisicoquímica de las compostas al término del proceso, se observa que el contenido de humedad en todos los casos disminuyó debido a la aireación realizada a lo largo del proceso manteniéndose en un valor óptimo.

El carbono se redujo en consecuencia de la degradación de la materia orgánica durante el proceso de composteo, ya que los microorganismos emplean como sustrato las fuentes de carbono. Esto a su vez se ve reflejado en la reducción de la relación C/N, además de que también existen pérdidas de nitrógeno por volatilización de amonio o lixiviación de nitrato (Acosta *et al.*, 2012).

Los pH obtenidos fueron básicos, en su mayoría se cumplió con el intervalo de pH ideal 6.5-8.5, salvo la composta RJ, esto pudo deberse a un alto contenido de nitrógeno en los residuos de jardinería (pasto verde), el cual a altas temperaturas genera amoníaco, aumentando el pH en la composta (Román *et al.*, 2013)

La conductividad eléctrica promedio en las compostas fue 0.85 dS/m siendo menor a 4 dS/m por lo tanto se cumplen con una calidad tipo A, de acuerdo con la NADF-020-AMBT-2011.

El contenido de cenizas aumentó, debido a que la mayor parte de los compuestos orgánicos fueron degradados, quedando en las compostas compuestos recalcitrantes o de lenta biodegradación como, por ejemplo, lignina (Bueno-Márquez *et al.*, 2008).

Tabla 6-12. Caracterización fisicoquímica final del proceso de composteo

Parámetro	Tratamiento			
	RJ	RJ-L	RJ-L-I	RJ-I
Humedad [%]	59.4±1.0	62.3±1.6	62.7±4.6	65.5±1.5
Materia Orgánica* [%]	47.02±2.3	48.7±3.0	42.4±2	52.3±4.4
Carbono total* [%]	27.3±1.4	28.3±1.7	24.9±1.1	28.9±0.8
Nitrógeno total* [%]	1.4±0.07	1.4±0.1	1.3±0.1	1.3±0.1
C/N*	20.4±1.3	18.9±1.5	16.7±1	19.9±1.5
pH	8.7±0.1	8.5±0.1	8.1±0.3	8.4±0.3
Conductividad eléctrica [dS/m]	0.62±0.03	0.57±0.06	0.82±0.09	1.4±0.15
Cenizas* [%]	51.3±2.7	49.9±3.4	56.4±2	47.3±4.3

*Porcentaje en base seca

En la Tabla 6-13, se muestran las concentraciones de metales en los diferentes tratamientos y el límite para una calidad excelente, donde en general los tratamientos cumplen con los límites máximos permisibles, los cuales pueden emplearse en usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación, uso agrícola, forestal y mejoramiento de suelos. Con excepción del tratamiento RJ+L, que sobrepasa el límite para Pb, por lo que se puede aprovechar en: usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación, uso agrícola, forestal y mejoramiento de suelos.

Tabla 6-13. Concentración de metales en las compostas

Composta	Concentración [mg/ kg]							
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni	pH	Al
RJ	8.8±0.4	24±1.4	53.3±0.8	107.5±17	118.2±1.6	36.6±12.2	8.7	12426±245.6
RJ+L	8.2±0.3	89±21.1	56.1±1.1	568±244	123.4±4.7	39.8±9.5	8.5	11903±1389.7
RJ+L+I	8.9±0.5	29±2.0	56.6±4.9	175.9±26	121.7±1.9	40.7±7.4	8.1	12217±1806.2
RJ+I	9.2±0.4	33±12.4	50±1.8	229.3±134	120.3±0.9	32.7±5.47	8.4	9511±56.9
Límite de la NOM 004	39	1200	1500	300	2800	420	-	* N. E

*N.E. No especificado

El contenido de aluminio en los tratamientos con lodo (RJ-L y RJ-L-I) es mayor que en los digestatos que están mezclados con lodos en mayor proporción (L50-RJ50, L40-RJ40-I20 y L80-I20) debido a que en el proceso de composteo hay una disminución de la materia seca por acción de la actividad microbiana, mientras que el aluminio no es degradado, por lo que este permanece constante (Panizza-de-León *et al.*, 2008). Sin embargo, al igual que los digestatos los valores de pH en las compostas son alcalinos por lo que el aluminio se encuentra en una forma insoluble.

La Tabla 6-14, muestran los valores cualitativos de los macronutrientes (N, P y K) presentes en las compostas, teniendo en su mayoría un contenido alto de nitrógeno y fósforo. Mientras que para el potasio el valor es bajo, el valor adecuado de cada nutriente estará en función del tipo de suelo y cultivo.

Tabla 6-14. Contenido de macronutrientes en las compostas

Composta	Macronutrientes		
	Nitrógeno (NO ₃)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potasio (K ₂ O)
RJ	alto	alto	bajo
RJ+L	alto	alto	trazas
RJ+L+I	alto	alto	trazas
RJ+I	alto	alto	bajo

El contenido de nitrógeno de la composta permite un adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas. Mientras que, el fósforo es empleado en el proceso de fotosíntesis y el potasio es esencial en la elaboración de carbohidratos y proteínas (Román *et al.*, 2013).

6.3.3.2 Parámetros microbiológicos

En la Tabla 6-15, se tiene la caracterización microbiológica de las compostas, RJ-L y RJ-I-L tuvieron una eficiencia de remoción para coliformes fecales del 97.4% y 97.1% respectivamente. El tratamiento RJ tuvo una eficiencia del 76.5%. Sin embargo, para ningún tratamiento se cumplió con el límite máximo permisible de <300 NMP en 4 g_{ST} para *Salmonella* estipulado en la norma, lo que puede deberse

a que no se logró mantener temperaturas termófilas por varios días en el proceso. Se ha reportado que *Salmonella spp* es eliminada a temperaturas entre los 55-65°C en un tiempo de exposición mínima de 1 hora (Román *et al.*, 2013).

Tabla 6-15. Caracterización microbiológica final

Parámetro	Tratamiento				Clase
	RJ	RJ-L	RJ-L-I	RJ-I	
Coliformes totales [NMP/g _{ST}]	6x10 ⁴ ±1.3x10 ⁴	7.5x10 ⁴ ±7.5x10 ³	1.3x10 ⁵ ±5.5x10 ⁴	7x10 ⁵ ±2.4x10 ⁵	N. E*
Coliformes fecales [NMP/g _{ST}]	6x10 ³ ±5.5x10 ³	1.4x10 ³ ±1.1x10 ³	9.7x10 ³ ±9.5x10 ³	6.9x10 ³ ±6.6x10 ³	C
<i>Salmonella spp.</i> [NMP/g _{ST}]	2.4x10 ⁴ ±0	2.4x10 ⁴ ±0	1.2x10 ⁵ ±1.2x10 ⁵	6.7x10 ⁴ ±4.3x10 ⁴	N. C.**
Huevos de helmintos viables	1.5±0.5	3±1	0±0	4.5±0.5	B

N. E.* No especificado, N. C.** No cumple

Se cumplió con el límite máximo permitido de <10 huevos de helmintos/g_{ST} para una clase B (usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación, aprovechamiento en usos forestales, mejoramientos de suelos y usos agrícolas).

En la Tabla 6-16 se presenta una compilación de trabajos donde se emplea el proceso de composteo para estabilizar lodos residuales, se obtuvieron temperaturas superiores a los 50°C, los valores de pH reportados van desde 4.8-7.8 y se presentó una disminución de microorganismos patógenos.

Se observa que la eficiencia de eliminación de coliformes fecales en este trabajo fue superior a la obtenida por Montes-Rivera (2004). Sin embargo, se tuvo presencia de helmintos y *Salmonella spp.*, esto puede ser debido al tamaño de las pilas, ya que en los trabajos realizados por Vicente-Mendoza y Virgíl-Sánchez (2012) y Vicencio-De la Rosa (2011), estas tuvieron un tamaño de 1 y 7 m³ respectivamente. Además, la concentración promedio de aluminio presente en las compostas fue de 11 514.25 mg/kg, la cual es menor a la reportada por Panizza de León en 2008 de 37 250 mg/kg, en ambos casos los valores de pH están entre 6.5 y 8, donde el aluminio es insoluble, por lo que se debe considerar los valores de pH del suelo al que se le aplicara la composta y si a largo plazo se puede presentar una disminución de pH a valores ácidos.

Tabla 6-16. Comparación de la calidad de compostas elaboradas con lodos residuales

Referencia	Sustratos	Condiciones	Resultados
Vicente y Vigíl, 2012	Lodos (desechados), materiales vegetales (residuos de poda) y estructurante (fibra de coco)	Pilas de un 1 m ³ , volteos intermitentes durante 120 días	Temperaturas superiores a los 55°C por 14 días, pH 4.8, %H _{promedio} 45, C/N _{promedio} 10, Coliformes totales y fecales < 1.8 NMP/g, Helmintos=Ausencia, <i>Salmonella</i> <10 UFC/25g y <i>Shigella</i> <10 UFC/25g
Vicencio-De la Rosa <i>et al.</i> , 2011	Lodos (sólidos primarios) provenientes de una PTAR del rastro municipal de la ciudad de Durango	Pilas de 2x1x3.5 m, aireación una vez por semana, duración del proceso 80 días.	Temperatura promedio de 52.5 °C por más de 40 días, pH 5, en el día 22 los Coliformes fecales fueron destruidos y a los 8 días ya no había Huevos de Helmintos, ni larvas.
Panizza de León <i>et al.</i> , 2008	Lodos con sulfato de aluminio, cáscara de piña, hojarasca y la viruta de cedro	Reactores de 0.39x0.35x0.29 m. Duración del composteo 121 días.	pH 7.8, C/N _{promedio} 14, concentración promedio de 37 250 mgAl/kgcomposta
Montes-Rivera <i>et al.</i> , 2004	Lodo fresco, alfalfa, paja de avena seca y estiércol fresco	Composteo realizado en cajas de 50x75x45 cm con manivela al centro, volteó cada 5 días, duración del proceso 45 días.	Remoción promedio de coliformes fecales del 95.4%, pH 6.63, materia orgánica 9.47,
Este trabajo	Lodos fisicoquímicos (L), residuos de jardinería (RJ) y estiércol fresco de vaca (I)	Pilas de 500 L, volteos diarios durante los primeros 15 días después 3 veces a la semana. Duración de 66 días.	%H _{promedio} 62.4, C/N _{promedio} 19, pH _{promedio} 8.4. Las compostas RJ-L y RJ-I-L tuvieron una eficiencia de remoción de coliformes fecales promedio del 97.2% y se tuvo una concentración promedio de 11 514.25 mg Al/kg composta

6.4 Pruebas de fitotoxicidad

En este apartado se muestran las condiciones ambientales en las que se llevó a cabo la experimentación para evaluar la fitotoxicidad para ambos productos finales y posteriormente los resultados para cada uno.

En la Figura 6-7 se presentan los rizotrones empleados en las pruebas de fitotoxicidad y la posición en la que se colocaron (ángulo de 45°, para asegurar que el crecimiento de la raíz fuese sobre la pared del rizotrón).

Figura 6-7. Rizotrones empleados para la prueba de fitotoxicidad

En la Figura 6-8 se presenta el comportamiento de la temperatura en el invernadero, donde se cumplieron con las condiciones establecidas por la OCDE. Teniendo temperaturas mínimas de 18°C y máximas cercanas a los 30°C.

Figura 6-8. Temperatura del invernadero para la prueba de fitotoxicidad

En la Figura 6-9, se muestra los resultados de la humedad promedio del invernadero que fluctuó entre 45 y 60%. Además, se tuvo una humedad promedio de 52%, cumpliendo con la humedad promedio de $70 \pm 25\%$ recomendada por la OCDE.

Figura 6-9. Humedad promedio del invernadero

6.4.1 Ensayo de viabilidad de las semillas

En la Tabla 6-17 se presentan los resultados de la viabilidad de los lotes de semillas de cempaxúchitl y girasol, utilizados en la prueba de germinación, teniendo un índice de germinación superior al 80%, cumpliendo con el requisito del 70% establecido por la OCDE.

Tabla 6-17. Viabilidad de las semillas

Especie	Porcentaje de viabilidad	Lotes	Prueba
Cempaxúchitl	86.67%
Girasol	80%

6.4.2 Índice de germinación

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de fitotoxicidad a través de la prueba de emergencia para ambos productos finales.

6.4.2.1 Índice de germinación de los digestatos en girasol y cempaxúchitl

En la Tabla 6-18, se presentan los índices de germinación obtenidos con los digestatos sin drenar. De acuerdo con los índices estipulados por Emino y Warman (2004) se tuvo una alta fitotoxicidad para el digestato L80-I20 en el girasol, mientras que, para el cempaxúchitl fue en los digestatos I-100 y L100.

Para los digestatos L100, L80-I20 e I100, la fitotoxicidad se puede deber a la presencia de amonio (NH_4^+), ya que los lodos y estiércol suelen contenerlo (N-urea+amonio) (Figueroa-Viramontes, *et al.*, 2009). El amonio en condiciones de humedad y calor se transforma en amoniaco, lo cual propicia un ambiente tóxico para el crecimiento de especies vegetales (Román *et al.*, 2013).

Tabla 6-18. Índice de germinación en digestatos

Tratamientos	IG [%]	
	Girasol	Cempaxúchitl
L100	52.1±10.3	11.3±3.1
I100	50.9±2.9	9.7±8.7
RJ100	69.5±3.6	109.7±1.8
L50-RJ50	98.6±5.5	112.6±4
L80-I20	46.7±11.1	98.4±11.1
L40-RJ40-I20	74.4±8.3	83.4±14
RJ80-I20	89.0±17.8	67.4±29.9

6.4.2.2 Índice de germinación de las compostas en girasol y cempaxúchitl

En la Tabla 6-19, se tienen los índices de germinación, donde el tratamiento de L+RJ para girasol presentó alta toxicidad, lo cual puede atribuirse a la presencia de cadmio, ya que se ha reportado que concentraciones entre 30-300 ppm son excesivas o tóxicas para varias especies (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Para el caso de cempaxúchitl ningún tratamiento presentó fitotoxicidad, cumpliendo con una calidad tipo A de la NADF-020-AMBT-2011.

Tabla 6-19. Índice de germinación en compostas

Tratamientos	IG [%]	
	Girasol	Cempaxúchitl
RJ	75.13±21.81	163.50±2.55
L+RJ	35.88±9.79	142.87±11.46
RJ+L+I	50.68±4.01	163.50±19.52
RJ+I	50.9±7.55	180.22±19.10

Cabe mencionar que la prueba de índice de germinación consiste en evaluar el porcentaje de germinación de las semillas en contacto con el digestato o composta (compuesto a evaluar) de acuerdo con la NADF-020-AMBT-2011. Esto es con el objetivo de determinar si existe algún efecto negativo en la germinación.

Caso contrario con la prueba de emergencia y crecimiento en plántulas de la OCDE, donde se evalúa el crecimiento de las especies vegetales en contacto con un suelo y las compostas o digestato durante 14-21 días. En esta prueba es posible visualizar daños como clorosis, marchitez, necrosis, deformación de hojas y tallos.

6.4.3 Prueba de emergencia y crecimiento en plántulas

En esta sección se muestran los comportamientos de emergencia y crecimiento de las plántulas (girasol y cempaxúchitl) para ambos productos finales, en una relación 80% suelo 20% composta o digestato. Además, se presentan los resultados del análisis estadístico para cada caso (crecimiento y generación de biomasa seca), en el apartado de anexos, se muestra este análisis detallado (ANEXO B). Cabe mencionar que se efectuó esta prueba en los productos finales que mostraron disminución en los índices de germinación en semillas de la sección 6.4.2 para corroborar la toxicidad.

6.4.3.1 Crecimiento y biomasa del girasol empleando los digestatos en suelo

La Figura 6-10, muestra el crecimiento de la raíz y tallo para el girasol en las mezclas de suelo con digestatos, en general la adición de los digestatos no perjudica el crecimiento de esta especie en comparación con el testigo (suelo sin digestatos). En el caso del lodo, no hubo germinación, lo que se corrobora con la prueba de índice de germinación.

Figura 6-10. Crecimiento de raíz y parte aérea del girasol en suelo-digestato

Los datos del crecimiento de raíz del girasol en las mezclas de suelo con digestatos se analizaron como datos no paramétricos ya que no tuvieron un comportamiento normal. El análisis de Kruskal-Wallis para la raíz, dio como resultado un valor-P de 0.00057675, que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95% de confianza.

La Figura 6-11 muestra el diagrama de caja de bigotes, donde las pruebas con los digestatos I100 y L100 tuvieron el menor crecimiento de la raíz, mientras que los tratamientos con los digestato L50-RJ50 y L40-RJ40-I20 resultaron favorecer el crecimiento de la raíz.

Figura 6-11. Caja y bigotes del crecimiento de raíz para girasol en suelo-digestato

La prueba de Kruskal-Wallis para la parte aérea, dio un valor-P de 0.0035393, por lo que hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas. La Figura 6-12, muestra que la mezcla con el digestato L100 no tuvo crecimiento, por otro lado, el resto de los tratamientos no presentan diferencias significativas.

Figura 6-12. Caja y bigotes del crecimiento de la parte aérea para girasol en suelo-digestato

En la Figura 6-13, se muestra que el testigo (suelo) produjo la mayor biomasa en la parte aérea. Se vio favorecida la producción de biomasa en la raíz en los tratamientos L50-RJ50 y RJ100, esto puede deberse que al momento de ser drenados el tratamiento L50-RJ50 en su mayoría fue hojarasca, la cual no favoreció la retención de humedad.

Figura 6-13. Generación de biomasa seca del girasol en suelo-digestato

Los datos para la generación de biomasa en la raíz de la especie vegetal donde se aplicó el producto final (digestatos) presentaron un comportamiento normal, por lo que se procedió a realizar una ANOVA simple. En la prueba de múltiples rangos para la biomasa de la raíz (Tabla 6-20), se identificaron 4 grupos homogéneos según la alineación de la letra X. Por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de las letras X. Siendo los casos L100 y RJ80-I20 en los que hubo menor crecimiento de biomasa en comparación con el testigo.

Tabla 6-20. Prueba de múltiples rangos de la biomasa seca para la raíz del girasol en suelo-digestato

Digestatos	Casos	Media	Grupos Homogéneos
L100	6	0.0	X
RJ80-I20	4	0.0271	XX
L40-RJ40-I20	6	0.0500667	XX
L80-I20	5	0.0582	XX
I 100	3	0.0583333	XX
Testigo	2	0.06535	XXX
RJ 100	6	0.0864833	XX
L50-RJ50	5	0.11312	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

La biomasa en parte aérea presentó un comportamiento no normal, por lo que al realizar la prueba de Kruskal-Wallis arrojó un valor-P de *0.000922947*, que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas. En la Figura 6-14, se observa que la adición de los digestatos ocasionó una disminución en la generación de biomasa de la parte aérea en comparación con el testigo.

Figura 6-14. Biomasa seca para la parte aérea del girasol en suelo-digestato

6.4.3.2 Crecimiento y biomasa del cempaxúchitl empleando los digestatos en suelo

La Figura 6-15, muestra que la aplicación de los digestatos ocasiono una disminución en el crecimiento de la raíz en comparación con el testigo, sin embargo, esta especie vegetal si germinó y se desarrolló en el lodo. Esto puede deberse a que el hábitat del cempaxúchitl es la vegetación perturbada, ruderal y arvense (hábitats modificados por la acción del ser humano, como ejemplo se tienen los campos de cultivo abandonados, zonas urbanas o bordes de caminos), lo cual le permite tener una mejor adaptación (Mondragón y Vibrans, 2009).

Figura 6-15. Crecimiento de raíz y parte aérea del cempaxúchitl en suelo-digestato

Los valores para el crecimiento de la raíz resultaron ser normales. En la prueba de múltiples rangos para la raíz, se identificaron 5 grupos homogéneos según la alineación de la letra X. No existe una diferencia estadísticamente significativa entre aquellos niveles que comparten una misma columna de las letras X. Por lo tanto, para el digestato I100 y el testigo existen diferencias significativas (Tabla 6-21), ya que para I100 no hubo un crecimiento del cempaxúchitl, caso contrario del testigo, en el cual se tuvo la mayor elongación. Además, los tratamientos RJ80-I20, L50-RJ50 y L40-RJ40-I20 presentaron el mayor crecimiento.

Tabla 6-21. Prueba de múltiples rangos de la raíz para cempaxúchitl en suelo-digestato

Digestatos	Casos	Media	Grupos Homogéneos
I 100	6	0.0	X
L80-I20	3	6.53333	X
L100	4	7.625	XX
RJ 100	3	12.4333	XXX
RJ80-I20	5	13.06	X
L50-RJ50	5	13.48	X
L40-RJ40-I20	3	13.5	XX
Testigo	3	20.5333	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

El crecimiento de la parte aérea para el cempaxúchitl presentó un comportamiento no normal. En la Figura 6-16, se observa que el tratamiento I100 no generó un crecimiento de la parte aérea. Mientras que, las mezclas con el resto de los digestatos generaron un mayor crecimiento en comparación con el testigo, siendo el mejor la mezcla con el digestato RJ100.

Figura 6-16. Caja y bigotes del crecimiento de la parte aérea para cempaxúchitl en suelo-digestato

En la Figura 6-17, se observa que los digestatos tienen un efecto negativo en la biomasa seca de la raíz, siendo los de mayor afectación RJ80-I20 y L40-RJ40-I20, debido a que estos digestatos están compuestos en su mayoría de residuos de jardinería (hojarasca) al momento de ser drenados, esto hizo que se dificultará la retención de humedad en los rizotrones.

Figura 6-17. Generación de biomasa seca del cempaxúchitl en suelo-digestato

Los datos de la biomasa de la raíz en los rizotrones donde se aplicaron los digestos para el cempaxúchitl resultaron no normales. La prueba de Kruskal-Wallis para la

biomasa de la raíz, obtuvo un valor-P de 0.00137951 , por lo que, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

La Figura 6-18, muestra que los tratamientos RJ100 y L80-I20 fueron los que presentaron mayor generación de biomasa seca de la raíz, en comparación con los demás tratamientos.

Figura 6-18. Caja y bigotes de la biomasa seca para la raíz del cempaxúchitl en suelo-digestato

Los datos de la biomasa en parte aérea tampoco tuvieron un comportamiento normal. El valor-P fue de 0.00250304 en la prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa de la parte aérea, por lo tanto, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95% de confianza.

Se puede observar en la Figura 6-19 que en los rizotrones donde se aplicó el digestato I100 no se presentó generación de biomasa seca, por otra parte, en los digestatos RJ80-I20 y RJ100 se favoreció la producción de biomasa.

Figura 6-19. Caja y bigotes de la biomasa seca para la parte aérea del cempaxúchitl en suelo-digestato

En general, se observó que los digestatos no lograban retener adecuadamente la humedad por lo que fue necesario regar con mayor frecuencia en comparación con las compostas. Cuando el déficit hídrico se desarrolla paulatinamente, ocurren cambios en sobre el crecimiento, los cuales producen varios efectos, entre los cuales están la limitación de la expansión foliar y el crecimiento radicular (Moreno, 2009).

6.4.3.3 Crecimiento y biomasa del girasol empleando las compostas en suelo

En la Figura 6-20, se observa que la adición de las compostas no perjudicó el crecimiento de la raíz y tallo del girasol en comparación con el testigo (suelo).

Figura 6-20. Crecimiento de la raíz y parte aérea del girasol en suelo-composta

Los datos del crecimiento de la raíz del girasol en las mezclas con compostas tuvieron un comportamiento normal, lo que permitió la identificación de 3 grupos homogéneos para el crecimiento de la raíz, de acuerdo con la alineación de la letra X (Tabla 6-22). No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de las letras X.

Tabla 6-22. Prueba de múltiples rangos para crecimiento de raíz en girasol en suelo-composta

Compostas	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	4	15.15	X
L-RJ	8	18.3	XX
RJ-I-L	8	19.15	XX
RJ	8	19.25	XX
RJ-I	8	21.45	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

El crecimiento en la parte aérea para el girasol con la adición de las compostas indicó que no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de

medias, con un 95% de confianza. Se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las letras X en columna (Tabla 6-23).

Tabla 6-23. Prueba de múltiples rangos para crecimiento de la parte aérea en girasol en suelo-composta

Compostas	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	4	24.525	X
L-RJ	8	24.85	X
RJ-I-L	8	25.4375	X
RJ	8	26.5625	X
RJ-I	8	26.7	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

En cuanto a la generación de biomasa seca, en la Figura 6-21, se tiene que en general se incrementó la biomasa seca de la parte aérea de la planta (tallo y hojas) en comparación con el testigo.

Figura 6-21. Generación de biomasa seca del girasol en suelo-composta

Para la generación de biomasa seca de la raíz en el girasol con la composta, los datos se analizaron como no paramétricos. En la prueba de Kruskal-Wallis, se tuvo un valor-P de *0.647844*, por lo tanto, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. La Figura 6-22 muestra la biomasa seca producida en los tratamiento con composta, los cuales tiene un comportamiento similar al testigo.

Figura 6-22. Caja y bigotes de la biomasa seca de la raíz del girasol en suelo-composta

Por otro lado, los datos de biomasa para la parte aérea tuvieron un comportamiento normal por lo que se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las letras X en columna (Tabla 6-24). No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de la letra X.

Tabla 6-24. Prueba de múltiples rangos de la biomasa de la parte aérea del girasol en suelo-composta

Compostas	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	4	0.08555	X
RJ-I-L	8	0.0949125	X
L-RJ	8	0.095825	X
RJ	8	0.117387	X
RJ-I	6	0.122433	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

6.4.3.4 . Crecimiento y biomasa del cempaxúchitl empleando las compostas en suelo

En la Figura 6-23, se muestra que en general el crecimiento de la raíz y parte aérea fue similar a la del testigo, con excepción del tratamiento con la composta L-RJ donde se vio ligeramente favorecido.

Figura 6-23. Crecimiento de raíz y parte aérea para cempaxúchitl en suelo-composta

El crecimiento de la raíz, en los tratamientos con composta indicó que los datos tuvieron un comportamiento normal, el análisis mostró que no hay diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza en los datos del crecimiento de raíz. Se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las letras X en columna (Tabla 6-25).

Tabla 6-25. Prueba de múltiples rangos del crecimiento de la raíz del cempaxúchitl en suelo-composta

Compostas	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	3	6.43333	X
RJ	6	7.08333	X
RJ-I	3	7.66667	X
RJ-I-L	4	7.725	X
L-RJ	5	8.34	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

Los datos de crecimiento de la parte aérea también con comportamiento normal indicaron que no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un 95% de confianza. Se identificó un grupo homogéneo, según la alineación de las letras X en columna (Tabla 6-26).

Tabla 6-26. Prueba de múltiples rangos de crecimiento de la parte aérea del cempaxúchitl en suelo-composta

Compostas	Casos	Media	Grupos Homogéneos
L-RJ	5	5.46	X
RJ-I-L	4	5.75	X
RJ	6	6.5	X
Testigo	3	6.73333	X
RJ-I	3	7.7	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

La Figura 6-24, muestra que la generación de biomasa de la parte aérea y raíz se mantiene similar con el tratamiento de únicamente suelo.

Figura 6-24. Generación de biomasa seca para cempaxúchitl en suelo-composta

Los datos para la biomasa de raíz con comportamiento normal mostraron que no hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un 95% de confianza (Tabla 6-27). Se identificó un grupo homogéneo, según la alineación de las letras X en columna.

Tabla 6-27. Prueba de múltiples rangos para biomasa de la raíz del cempaxúchitl en suelo-composta

Compostas	Casos	Media	Grupos Homogéneos
RJ-I-L	4	0.001	X
RJ-I	3	0.0013	X
L-RJ	5	0.00148	X
RJ	6	0.00158333	X
Testigo	3	0.00193333	X

Método: 95.0 porcentaje LSD

A su vez los datos para biomasa seca en la parte aérea fueron analizados como no paramétricos y dado que el valor-P obtenido fue 0.71, no existe una diferencia estadísticamente significativa. La Figura 6-25, muestra que la biomasa seca de la parte aérea producida por las compostas L-RJ, RJ y RJ-I-L fue menor a la del testigo.

Figura 6-25. Caja y bigotes de la biomasa seca de la parte aérea del cempaxúchitl en suelo-composta

6.5 Calidad de los productos finales

La Tabla 6-28, presenta la comparación de la caracterización entre los productos finales de cada proceso. En los parámetros fisicoquímicos, se observa que el contenido de humedad varía debido a que la digestión requirió de un mayor contenido de agua. En cuanto al contenido de metales pesados, en general se cumple una calidad excelente, con excepción del reactor L100 y la composta L+RJ.

Los digestatos L100 e I100 afectaron el índice de germinación del cempaxúchitl y girasol, lo cual se mantuvo en las pruebas con plántulas. Sin embargo, para el caso de las compostas, la composta L+RJ presentó un efecto negativo en el girasol y en la prueba de crecimiento en plántulas no hubo diferencias estadísticamente significativas. Esto puede deberse a que en la prueba de germinación el contacto de la composta fue directo sobre la semilla y en el caso de la prueba de crecimiento se tiene una mezcla de suelo con la composta (80:20), el suelo le da soporte a la plántula permitiéndole adaptarse y asimilar mejor las condiciones proporcionadas por la composta.

Tabla 6-28. Tabla comparativa de los procesos de digestión anaerobia y composteo

Digestato	Composta
Parámetros fisicoquímicos	
El porcentaje de humedad osciló entre 68-98%. Relación C/N en la mayoría de los digestatos fue superior a 20 y los valores de pH fueron neutros (7-8)	La humedad final de las compostas estuvo entre un 59-65%. La relación C/N osciló entre 16.7-20.4 y los valores de pH estuvieron dentro de 8.1-8.7
Metales pesados	
Se cumplieron con los límites para una calidad excelente, con excepción del digestato L100 (lodos) que sobrepasó el límite para cadmio	Las compostas cumplieron con los límites para una calidad buena
Coliformes fecales	
El contenido de coliformes disminuyó con una eficiencia entre 86- 99%, cumpliendo con el límite para un tipo C	Las compostas RJ-L y RJ-I-L tuvieron una eficiencia de remoción del 97.4% y 97.1% respectivamente, cumpliendo con el límite para un tipo C
<i>Salmonella spp</i>	
No se cumplió con el límite establecido	No se cumplió con el límite establecido
Helmintos	
El mayor contenido se obtuvo en los digestatos L100 e I100, sin embargo, se cumplió con el límite de tipo B	Se cumplió con el límite de tipo B, las compostas RJ-L y RJ-I fueron las que tuvieron mayor cantidad de huevos 3 y 4.5 respectivamente
Índice de germinación	
Los digestatos L100 e I100 afectaron el IG de ambas especies. Los digestatos RJ100 e L40-RJ40-I20 presentaron una toxicidad moderada en el girasol. Para el cempaxúchitl RJ80-I20 presentó una toxicidad moderada y el resto de los digestatos no presentaron fitotoxicidad	La composta L+RJ presentó un efecto negativo en el girasol. Mientras que, para el cempaxúchitl se favoreció el índice de germinación en todas las compostas
Fitotoxicidad	
El girasol no creció en el digestato L100, mientras que el cempaxúchitl no germinó en el tratamiento I100. En general, en los demás digestatos si hubo crecimiento de las especies ensayadas	Las compostas no presentaron diferencias entre ellas, por lo que tienen un comportamiento similar al testigo (suelo), por lo que se corrobora que no son tóxicas

En la Tabla 6-29, se observan las características fisicoquímicas y microbiológicas de los productos finales obtenidos en los procesos de digestión anaerobia y composteo en promedio para ambos. Debido a la naturaleza de los procesos estos presentan características diferentes, sin embargo, éstos no afectan la calidad. Para ambos procesos se tuvo una calidad C, por lo que los productos podrían emplearse en uso forestal, mejorador de suelos y usos agrícolas, una vez que se disminuya la cantidad de *Salmonella spp*. Se decidió realizar una comparación de algunos parámetros con la NADF-020-AMBT-2011, esto es con la finalidad de evaluar la

calidad en cuanto a la relación carbono-nitrógeno, materia orgánica, pH e índice de germinación.

Tabla 6-29. Resultados finales de la calidad de los productos finales

Parámetro	Digestión	Clase	Composteo	Clase	Norma
ST [%]	14.51	C	37.55	C	NADF-020-AMBT-2011
pH	7.53	A	8.44	B	NADF-020-AMBT-2011
Materia Orgánica [%]	78.92	C	47.52	C	NADF-020-AMBT-2011
Nitrógeno Total [%]	1.72	1-4	1.36	1-4	NADF-020-AMBT-2011
Relación C/N	35.4	C	20.4	C	NADF-020-AMBT-2011
Cenizas [%]	21.17	-	51.31	-	NADF-020-AMBT-2011
IG [%]	69.56	C	107.23	A	NADF-020-AMBT-2011
Coliformes Fecales NMP/g _{ST}	8.75x10 ⁴	C	5.98x10 ³	C	NOM-004-SEMARNAT-2002
Huevos de helmintos/g _{ST}	4	B	2	B	NOM-004-SEMARNAT-2002
<i>Salmonella spp.</i> NMP/g _{ST}	7.87x10 ⁴	C	5.97x10 ⁴	C	NOM-004-SEMARNAT-2002

Para poder comparar ambos procesos se pueden discutir las ventajas y desventajas de cada uno, el composteo presentó su principal ventaja en la disminución del volumen y la masa del material empleado y no se requiere de material o equipos especializados. Entre sus desventajas se encuentra que se requiere de un espacio amplio para realizar el proceso y éste puede durar entre 2 a 6 meses, además de requerir mayores volúmenes en la pila para lograr mantener las temperaturas termófilas y con ello lograr destruir los microorganismos como la *Salmonella spp.*

Las ventajas de la digestión anaerobia son: degradación y estabilización del material sometido, obtención de biogás; y se puede trabajar con volúmenes pequeños (100 mL). Dentro de las desventajas se encuentra que se requiere mantener una temperatura constante y se necesitan equipos especializados para realizar la agitación y caracterización del biogás, además se debe evaluar en condiciones termófilas para logra la destrucción de microorganismos y con esto la energía necesaria para mantener estas condiciones puede no ser sostenible con respecto a la energía que se puede producir por la producción de biogás.

Ambos procesos evaluados mostraron la ventaja de que pese al alto contenido de aluminio presente en los lodos provenientes del proceso fisicoquímico y que se podría pensar que causarían alguna inhibición de ambos procesos biológicos, esto no fue así y da la oportunidad de tratar un residuo y obtener productos que pueden ser útiles.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

7 Conclusiones

Se demostró que los lodos de la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales pueden ser estabilizados en los procesos de digestión anaerobia y composteo. Además de que los productos finales son susceptibles de emplearse en usos agrícolas y forestales con el objetivo de mejorar las características físicas, químicas o microbiológicas de los suelos.

Ambos procesos biológicos son viables para la estabilización del lodo fisicoquímico generado en la Planta Piloto de Aguas Residuales de la UAM-A. En general, se cumplieron con los parámetros de la normatividad (con excepción de *Salmonella spp*), teniendo para ambos productos finales una clasificación de tipo C, la cual se puede aplicar para uso agrícola, forestal y de mejorador de suelos.

Por una parte, el proceso de digestión anaerobia de los lodos se vio favorecido al realizar un proceso de co-digestión con residuos de jardinería y estiércol, ya que los lodos por sí solos no cumplen con los requisitos necesarios para una adecuada digestión, ya que el reactor con mayor contenido de residuos de jardinería presentó el mayor volumen producido de biogás, sin embargo, al evaluar el rendimiento por cantidad de sustrato adicionada no existe una correlación y este tipo de mezcla es más difícil de degradar.

El mayor rendimiento de la producción de metano se obtuvo en los reactores L80-I20 y L40-RJ40-I20, con 9.5 y 2.2 mLCH₄/g_{SV} respectivamente. Se demostró que los lodos de origen fisicoquímico pueden ser aprovechados en la generación de metano. Además, la mezcla L80-I20 tiene la mayor composición de lodos, por lo que se puede estabilizar un gran volumen de éstos, en su aplicación a escala se pretende escalar el proceso de digestión para así cumplir con el Plan Institucional Hacia la Sustentabilidad de la UAM-A.

Con esto se demuestra que el empleo de los residuos de jardinería no es un factor principal para lograr obtener buenos rendimientos en el tratamiento de los lodos que fue el principal objetivo de este trabajo. Sin embargo, se da una pauta para continuar con el estudio de diferentes proporciones de lodos, estiércol y/o residuos de jardinería para tratar de aumentar el rendimiento, ya que este es susceptible de mejorar para así dar tratamiento a los residuos de poda que se generan en la universidad.

En general, se disminuyó la carga de microorganismo patógenos, para coliformes totales y fecales se tuvieron eficiencias en su mayoría del 99%, cumpliendo con el límite máximo permisible de $<2 \times 10^6$ NMP/g_{ST} de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Además, también se cumplió con el límite de huevos de helmintos, el cual es <10 en 4 g_{ST}.

Sin embargo, para *Salmonella spp* no se logró cumplir con la normatividad vigente, la cual establece un límite <300 NMP/g_{ST}, debido a que la digestión se llevó a cabo en condiciones mesofílicas, este microorganismo comienza a decaer a temperaturas superiores a los 50°C.

Se tuvo una calidad tipo C, por lo que los digestatos podrían ser susceptibles de emplearse en uso forestal, mejorador de suelos y usos agrícolas, una vez estabilizado el parámetro de *Salmonella spp*.

Por otro lado, en el proceso de composteo la pila testigo (RJ100) y la de lodos con residuos de jardinería (L20+RJ80) alcanzaron temperaturas superiores a los 55°C. Mientras que, las pilas de residuos de jardinería e inóculo (RJ65+I35); y lodos, inóculo y jardinería (RJ65+I25+L10) alcanzaron 52°C y 49°C respectivamente. Se logró reducir los coliformes totales y fecales, al igual que los huevos de helmintos, cumpliendo con la NOM-004-SEMARNAT-2002. Sin embargo, para el contenido de *Salmonella spp* no cumple con la norma, esto se puede atribuir a que faltó conservar más días una temperatura superior a 55°C.

Las compostas obtenidas cumplen con una calidad tipo C, por lo que son susceptibles de emplearse en uso forestal, mejorador de suelos y usos agrícolas, una vez que se disminuya la carga de *Salmonella spp*.

El aluminio presente en las compostas está en una forma insoluble, lo cual significa que no está en una forma química asimilable para las plantas. Al igual que el caso de los digestatos se sugiere su aplicación en suelos con valores de pH neutros o alcalinos para evitar que este disminuya y el aluminio pueda estar en forma disponible.

Los metales pesados evaluados en los digestatos y compostas cumplieron en su mayoría con una calidad excelente. Además, el contenido de aluminio presente en los productos finales se encuentra en una forma química insoluble, es decir, no se encuentra biodisponible para las especies vegetales, debido a que los valores de pH obtenidos se encuentran entre 7-8, lo cual favorece que el aluminio permanezca en este estado y no cause algún efecto sobre el crecimiento. Se sugiere su aplicación en suelos con valores de pH neutros o alcalinos para evitar que este disminuya y el aluminio pueda estar en forma disponible.

De la misma manera que el proceso de digestión el composteo no se vio afectado por la alta concentración de aluminio y el proceso se llevó a cabo de manera satisfactoria.

En cuanto a las pruebas de germinación y crecimiento en plántulas cada especie vegetal presenta características propias, por lo que el crecimiento que se generó fue diferente para cada especie.

No se presentaron severas disminuciones en el crecimiento y biomasa en ambas especies vegetales (girasol y cempaxúchitl). Se tuvieron disminuciones en el índice de germinación para el girasol en el tratamiento L80-I20 (46.7%) y para el cempaxúchitl en los procesos L100 (11.3%) e I100 (50.9%) de la digestión anaerobia. Mientras que, en la composta se presentó un IG del 35.8% para la mezcla de lodos con residuos de jardinería (L-RJ) para el girasol, se puede inferir que la disminución es provocada por la alta concentración de cadmio (568 mg/kg).

En la prueba de crecimiento en plántulas en general no se presentaron disminuciones en el crecimiento de la raíz y parte aérea, salvo para el cempaxúchitl con los digestatos. El mayor beneficio en el crecimiento de las especies vegetales se vio reflejado en las compostas.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la estabilización de los lodos fisicoquímicos es factible por cualquiera de los dos tratamientos estudiados y de acuerdo con lo mencionado en cuanto ventajas y desventajas de cada uno, la implementación de alguno de ellos dependerá de los recursos de infraestructura con los que se cuente, quizá por las condiciones de la UAM-A convenga, de momento, realizar el proceso composteo.

En general, se sugiere comenzar con la estabilización mediante composteo, ya que no requiere equipo especializado, por lo que este tipo de tratamiento puede estar al alcance de la mayoría de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del país.

Capítulo 8

RECOMENDACIONES

8 Recomendaciones

Se recomienda realizar un tren de tratamiento para una mejor estabilización microbiológica y degradación de los residuos para el proceso de digestión, ya que la apariencia de los residuos de jardinería se observa aún entera, este tren consistiría en un proceso de digestión anaerobia, una vez concluida, el digestato se sometería a un proceso de composteo, logrando así una mayor estabilización microbiológica. También se sugiere triturar los residuos de jardinería para aumentar el área de contacto y así facilitar la agitación en los reactores.

También se puede implementar una digestión anaerobia termófila para eliminar el contenido de *Salmonella spp*, analizar si esto mejora el rendimiento de metano y examinar si se puede suplantar la energía fósil necesaria para mantener las condiciones termófilas.

Para el caso de las pilas de composteo se sugiere incrementar el tamaño de las pilas a 1 m³, ya que esto permite una mayor porosidad, lo que facilita la aireación y por lo tanto un incremento en la temperatura, lo cual permitiría mantener altas temperaturas por mayor tiempo y así aumentar la higienización.

Capítulo 9

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9 Referencias bibliográficas

- Acosta, Y., Zárraga, A., Rodríguez, L., & El Zauahre, M. (2012). Cambios en las propiedades fisicoquímicas en el proceso de compostaje de lodos residuales. *Multiciencias*, 12, 18–24.
- Agrowaste. (n.d.). Digestión Anaerobia. Consultado el 3 de Marzo de 2018 en: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>
- Aiyuk, S., Forrez, I., Lieven, D. K., Van Haandel, A., & Verstraete, W. (2006). Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates-A review. *Bioresource Technology*, 97(17), 2225–2241.
- Aleph. (Marzo, 2007). Planta piloto de tratamiento de agua residual. Consultado el 15 de Enero 2018 en: <https://www.azc.uam.mx/aleph/numeros/aleph115.pdf>
- APHA (1992) Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales. Asociación Americana de Salud Pública.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781.
- Bueno-Márquez, P., Díaz-Blanco, J. M., & Cabrera-Capitán, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. In Mundi Prensa Libros (Ed.), *Compostaje* (pp. 93–110). España.
- Carbajal-Azcona, Á. (2013). *Manual de Nutrición y Dietética*. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Castañeda-Briones, M. (2009). *Microbiología Aplicada, Manual de laboratorio* (Primera). México.
- Centro de Calidad Ambiental. NMX-AA-137-SCFI-2007 Potabilización del agua para uso y consumo humano-poliacrilamidas-Especificaciones y métodos de prueba (2007). México: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Guía para el manejo, tratamiento y disposición de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales*. (SEMARNAT, Editor) (Edición 2007). México.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). *Infraestructura Hidráulica*. (SEMARNAT, Editor.), *Estadísticas del agua en México, Edición 2011*. México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2016*. México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). *Estadísticas del agua en México*. México.
- DGN (Dirección General de Normas). Norma Mexicana NMX-AA-67-1985, Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales Determinación de la Relación Carbono/Nitrógeno (1992). México: Diario Oficial de la Federación.
- Echavarria-Acosta, D. (2014). Proyecto de Integración de Ingeniería Ambiental "Producción de abono orgánico a partir de lodos estabilizados provenientes de la PPTAR de la UAM-A". Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Emino, E. R., & Warman, P. R. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science and Utilization*, 12(4), 342–348.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2011). *Manual de biogás*. Chile. Consultado el 30 de Diciembre de 2017 <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Fatunla, K., Inam, E., Essien, J., Dan, E., Odon, A., Kang, S., & Semple, K. T. (2017). Influence of composting and thermal processing on the survival of microbial pathogens and nutritional status of Nigeria sewage sludge. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(4), 301–310.
- Fernández, J., Pérez, M., & Romero, L. I. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology*, 99(14), 6075–6080.
- Figuerroa-Viramontes, U., Núñez-Hernández, G., Delgado, J., Cueto-Wong, J., & Flores-Margez, J. (2009). Estimación de la producción de estiércol y de la excreción de nitrógeno, fósforo y potasio por bovino lechero en la Comarca Lagunera. In I. Orona, E. Salazar, M. Fortis, H. Trejo, C. Vázquez, J. López, ... J. Chavarría (Eds.), *Agricultura Orgánica* (Segunda Ed, pp. 128–154). México.
- García-García, B. A. (2016). Tesis de maestría "Composteo de los lodos generados en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM-Azcapotzalco". Universidad Autónoma Metropolitana. México.

- Gavala, H. N., Yenal, U., Skiadas, I. V., Westermann, P., & Ahring, B. K. (2003). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. *Water Research*, 37(19), 4561–4572.
- González-Aragón, A., Beltrán-Villavicencio, M., Pérez-Alva, A. O., & Medina-Tovar, L. (2006). *Operación de la Planta Piloto de Tratamiento de Agua de la UAM-A. Antecedentes y perspectivas (Reporte interno)*. México.
- González-Cabrera, A. M. (2014). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*. Universidad de Sevilla.
- HANNA instruments. (2013). Soil Test Handbook, Soil Science and Management.
- Hernández-Martínez, B. (2010). *Aprovechamiento de levaduras para la producción de metano: sustrato único y en codigestión con lodos activados*. UNAM.
- Julio-Guerrero, I. C., Peláez-Jaramillo, C. A., & Molina-Perez, F. (2016). Anaerobic co-digestion of municipal sewage sludge with food waste. *Investigación, Optimización y Nuevos Procesos En Ingeniería*, 29(1), 63–70.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*. (C. Press, Ed.), *Trace Elements in Soils and Plants*, Tercera Edición.
- Limón-Macías, J. G. (2013). *Tratamiento de Aguas Residuales , ¿Problema o Recurso? Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?*. Academia de Ingeniería Guadalajara. México.
- Londoño-Montoya, L. A. (2008). Proyecto de Integración de Ingeniería Ambiental "Evaluación y estabilización de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAM-A". Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Lorenzo-Acosta, Y., & Obaya-Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Instituto Cubano de Investigaciones de Los Derivados de La Caña de Azúcar Cuba Lorenzo*, XXXIX(1), 35–48.
- Luste, S., & Luostarinen, S. (2010). Anaerobic co-digestion of meat-processing by-products and sewage sludge - Effect of hygienization and organic loading rate. *Bioresource Technology*, 101(8), 2657–2664.
- Manyi-Loh, C. E., Mamphweli, S. N., Meyer, E. L., Okoh, A. I., Makaka, G., & Simon,

- M. (2014). Inactivation of selected bacterial pathogens in dairy cattle manure by mesophilic anaerobic digestion (balloon type digester). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(7), 7184–7194.
- Massé, D., Gilbert, Y., & Topp, E. (2011). Pathogen removal in farm-scale psychrophilic anaerobic digesters processing swine manure. *Bioresource Technology*, 102(2), 641–646.
- Mondragón-Pichardo, J., & Vibrans, H. (Agosto, 2009). *Tagetes erecta* L. Consultado el 5 de Enero de 2020 en: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/asteraceae/tagetes-erecta/fichas/ficha.htm>
- Montes-Rivera, G., Jiménez-Sánchez, H., & Solís-González, S. (2004). Lodos residuales composteados; una alternativa de sustrato para la producción de planta de Agave durangensis *Agave durangensis*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 10(1), 21–24.
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179–191.
- Murto, M., Björnsson, L., & Mattiasson, B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*, 70(2), 101–107.
- Nafez, A. H., Nikaeen, M., Kadkhodaie, S., Hatamzadeh, M., & Moghim, S. (2015). Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(11), 9.
- Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 473–492.
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). (2006). *OECD Test Guideline 208: Terrestrial Plant Test - Seedling Emergence and Seedling Growth Test. Guidelines for the Testing of Chemicals, Terrestrial Plant Test Seedling Emergence and Seedling Growth Test*.
- OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental). (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Perú.
- Oropeza-García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1, 51–58.

Panizza-de-León, A., Aldama-Ojeda, A., Chacalo-Hilu, A., Vaca-Mier, M., Grabinsky-Steider, J., Márquez-Herrera, C., & Durán-de-Bazúa, C. (2008). Evaluación del compost elaborado a partir de lodos con alto contenido de sulfato de aluminio. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(3), 342–348.

PPTAR (Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales). (2012). Diagrama de operación de la PPTAR. México.

Protección Civil UAM-A. (n.d.). Puntos de Reunión UAM Azcapotzalco. Consultado el 27 de Julio de 2018 en <https://www.azc.uam.mx/proteccioncivil/planes/PlanoPuntosReunionUAMA.pdf>

Rivera, Y., Moreno, L., Herrera, M., & Romero, H. (2016). La toxicidad por aluminio (Al^{3+}) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Palmas*, 37(1), 11–23.

Robles-Mitma, M. B. (2015). *Evaluación de parámetros de temperatura, pH y humedad para el proceso de compostaje en la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado*. Universidad Nacional Agraria De La Selva. Perú.

Rojas-Oropeza, M., Castro-Ortiz, P. L., Cabirol, N., & Noyola, A. (2000). *Remoción de parásitos (huevos de helminto) vía la digestión anaerobia mesofílica y termofílica en lodos municipales*. México. Consultado el 19 de Septiembre de 2019 en: https://pdfs.semanticscholar.org/60cd/53a3d89b8ca5d5f67780e9e0e2ab1d5e8218.pdf?_ga=2.147703733.344056506.1565634256-975269356.1565634256

Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. Chile. Consultado el 19 de Enero de 2018 en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., & Mora, M. (2005). *Métodos de análisis de compost*. (I. de I. Agropecuarias, Ed.). Chile.

Sarabia-Méndez, M. A., Laines-Canepa, J. R., Sosa-Olivier, J. A., & Escalante-Espinosa, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 109–116.

Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. Norma Ambiental para el Distrito

Federal L NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las mínimas (2012). México: Gaceta Oficial del Distrito Federal. Consultado el 5 de Enero de 2018 en: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/577/290/22c/57729022cdb18069720357.pdf>

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente). Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos, Gaceta del gobierno (2006). Consultado el 28 de Octubre de 2019 en https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_nte_a_006_sma_rs_2006.pdf

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis., Diario Oficial de la Federación (2002). México.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. (2003). México: Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2013). *Residuos Sólidos Urbanos*. México. Consultado el 7 de Octubre de 2019 en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf

Siddique, M. N. I., & Wahid, Z. A. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of Cleaner Production*, 194(1), 359–371.

Song, Y. C., Kwon, S. J., & Woo, J. H. (2004). Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water Research*, 38(7), 1653–1662.

Sosnowski, P., Wieczorek, A., & Ledakowicz, S. (2003). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Advances in Environmental Research*, 7(3), 609–616.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Trillo Montsoriu, J. d. D., & Cajigas, Á. (1995).

Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización (Tercera ed). España: McGraw-Hill.

- Torres, P., Pérez, A., Escobar, J. C., Uribe, I. E., & Imery, R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Eng. Agríc.*, 27(1), 267–275. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n1/21>
- Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia-Romero, L. I., & Ng, W. J. (2018). Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 380–399.
- Van Haandel, A. C., & Van der Lubbe, J. G. M. (2012). Sludge treatment and disposal. In *Handbook of Biological Wastewater Treatment* (Segunda, pp. 391–399). London.
- Vicencio-De la Rosa, M. G., Pérez-López, M. E., Medina-Herrera, E., & Martínez-Prado, M. A. (2011). Producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), 263–270.
- Vicente-Mendoza, M., & Vigíl-Sánchez, J. A. (2012). Tesis de licenciatura "Evaluación físico-química y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost". Universidad de El Salvador.
- Villegas-Ramos, R. (2009). Proyecto de Integración de Ingeniería Ambiental "Evaluación del proceso de estabilización-deshidratación de lodos de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la UAM-Azcapotzalco". Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- Wichuk, K. M., & McCartney, D. (2007). A review of the effectiveness of current time–temperature regulations on pathogen inactivation during composting. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(5), 573–586.
- Wilken, D., Rauh, S., Fruhner-Weiß, R., Strippel, F., Bontempo, G., Kramer, A., ... Nelles, M. (2018). *Digestato como fertilizante*. Alemania. Consultado el 5 de Enero de 2019 en: https://www.digestate-as-fertilizer.com/Download/Digestato_como_fertilizante.pdf
- Zhang, Y., Li, H., Liu, C., & Cheng, Y. (2015). Influencing mechanism of high solid concentration on anaerobic mono-digestion of sewage sludge without agitation. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 9(6), 1108–1116.

Anexo A

Cálculo de humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, materia orgánica, carbono y cenizas

A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las pruebas descritas con anterioridad (5.7.1.1).

- Humedad y sólidos totales

$$\text{Humedad } [\%] = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0} * 100 \dots \dots \text{Ecuación 5-1}$$

$$\text{Sólidos totales } [\%] = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} * 100 \dots \dots \text{Ecuación 5-2}$$

Donde:

P₀: masa constante del crisol vacío (g)

P₁: masa del crisol con la muestra húmeda (g)

P₂: masa constante del crisol con la muestra seca (g)

- Sólidos volátiles y cenizas

$$\text{Sólidos volátiles } [\%] = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_0} * 100 \dots \dots \text{Ecuación 5-3}$$

Donde:

P₀: masa constante del crisol vacío (g)

P₂: masa constante del crisol con la muestra seca (g)

P₃: masa constante del crisol con la muestra calcinada a 550°C (g)

- Materia orgánica

$$\text{M.O} [\%] = \frac{G_2 - G_3}{G_2 - G_1} * 100 \dots \dots \text{Ecuación 5-4}$$

Donde:

G₁: masa en g del crisol vacío

G₂: masa en g de crisol más muestra seca

G₃: masa en g de la muestra calcinada (650°C)

- Carbono

$$\text{Carbono } [\%] = \text{M.O} [\%] * 0.58 \dots \dots \text{Ecuación 5-5}$$

- Cenizas

$$Cenizas [\%] = \frac{P_3 - P_0}{P_2 - P_0} * 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 5-6}$$

Donde:

P₀: masa constante del crisol vacío (g)

P₂: masa constante del crisol con la muestra seca (g)

P₃: masa constante del crisol con la muestra calcinada a 800°C (g)

Cálculo para la alcalinidad total por CaCO₃

La alcalinidad total por CaCO₃ se calcula con la siguiente ecuación:

$$Alcalinidad\ total \left[\frac{mg\ CaCO_3}{kg} \right] = \frac{V_2 * N * P_{eq}\ CaCO_3}{m_h} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5-7}$$

Donde:

V₂: volumen de titulación de H₂SO₄ para llegar hasta pH 4.3 (mL)

N: normalidad de la solución titulante de H₂SO₄ (meq/mL)

P_{eq} CaCO₃: peso equivalente del carbonato de calcio (50 mg CaCO₃/ meq)

m_h: peso de la muestra húmeda (kg)

Cálculo para nitrógeno total

Para la determinación de nitrógeno total, se emplea la ecuación 5-8:

$$N = \frac{(T-B)*N*1.4}{S} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5-8}$$

Donde:

T: volumen [mL] de la solución valorada de ácido sulfúrico gastados en la titulación de las muestras (composta o digestato)

B: volumen [mL] de la solución valorada de ácido sulfúrico gastados en la titulación del blanco

N: Normalidad exacta del ácido sulfúrico

S: Peso en g de la muestra de composta o digestato en base seca

Cálculo para la concentración de metales pesados

Para realizar los cálculos de la concentración de los metales contenidos en las muestras se emplea la Ecuación 5-9:

$$\frac{\text{mg metal}}{\text{kg de mejorador de suelo}} = \text{lect.} \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] * \frac{1\text{L}}{1000 \text{ mL}} * \text{volumen de aforo [mL]} * \frac{1}{\text{g de muestra}} * \frac{1000 \text{ g}}{\text{kg de muestra}} \dots \text{Ecuación 5-9}$$

Cálculo para coliformes totales, fecales y *Salmonellas spp*

Finalmente se determina el NMP/g base seca, para ello se utiliza la Ecuación 5-10.

$$\frac{\text{NMP}}{\text{g}_{ST}} = \text{NMP de tablas} * \frac{10}{\text{mayor volumen inoculado}} \dots \dots \text{Ecuación 5-10}$$

Anexo B

Análisis estadístico detallado de las pruebas de fitotoxicidad en plantas

- Digestión anaerobia

Girasol crecimiento de la raíz

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para RAIZ [CM]

Prueba Kolmogorov-Smirnov, conocida como prueba K-S, es una prueba para verificar si los datos de la muestra proceden de una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que RAIZ [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

	<i>Normal</i>
DMAS	0.131482
DMENOS	0.236832
DN	0.236832
Valor-P	0.0315092

Prueba de Kruskal-Wallis para RAIZ [CM] por DIGESTATO

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

<i>DIGESTATO</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
I 100	3	12.0
L100	6	3.5
L40-RJ40-I20	6	26.25
L50-RJ50	5	32.7
L80-I20	5	21.6
RJ 100	6	20.0833
RJ80-I20	4	14.25
Testigo	2	19.75

Estadístico = 25.6703 Valor-P = 0.00057675

Girasol crecimiento de la parte aérea

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para PA [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que PA [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

	Normal
DMAS	0.144246
DMENOS	0.314016
DN	0.314016
Valor-P	0.00135534

Prueba de Kruskal-Wallis para PA [CM] por DIGESTATO

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

DIGESTATO	Tamaño Muestra	Rango Promedio
I 100	3	13.1667
L100	6	3.5
L40-RJ40-I20	6	20.0833
L50-RJ50	5	19.2
L80-I20	5	20.4
RJ 100	6	27.6667
RJ80-I20	4	23.0
Testigo	2	33.0

Estadístico = 21.1608 Valor-P = 0.0035393

Gráfico Caja y Bigotes

Girasol biomasa seca de la raíz

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para RAIZ MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que RAIZ MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

	Normal
DMAS	0.110092
DMENOS	0.106987
DN	0.110092
Valor-P	0.760959

Tabla ANOVA para RAIZ MASA [G] por DIGESTATO

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de RAIZ MASA [G] entre un nivel de DIGESTATO y otro, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0.0444636	7	0.00635194	6.16	0.0002
Intra grupos	0.0299159	29	0.00103158		
Total (Corr.)	0.0743795	36			

Pruebas de Múltiple Rangos para RAIZ MASA [G] por DIGESTATO

Se han identificado 4 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>DIGESTATO</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
L100	6	0.0	X
RJ80-I20	4	0.0271	XX
L40-RJ40-I20	6	0.0500667	XX
L80-I20	5	0.0582	XX
I 100	3	0.0583333	XX
Testigo	2	0.06535	XXX
RJ 100	6	0.0864833	XX
L50-RJ50	5	0.11312	X

El asterisco que se encuentra al lado de los 11 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
I 100 - L100	*	0.0583333	0.0464494
I 100 - L40-RJ40-I20		0.00826667	0.0464494
I 100 - L50-RJ50	*	-0.0547867	0.0479728
I 100 - L80-I20		0.000133333	0.0479728
I 100 - RJ 100		-0.02815	0.0464494
I 100 - RJ80-I20		0.0312333	0.0501711
I 100 - Testigo		-0.00701667	0.0599659
L100 - L40-RJ40-I20	*	-0.0500667	0.0379258
L100 - L50-RJ50	*	-0.11312	0.0397769
L100 - L80-I20	*	-0.0582	0.0397769
L100 - RJ 100	*	-0.0864833	0.0379258
L100 - RJ80-I20		-0.0271	0.0424023
L100 - Testigo	*	-0.06535	0.0536352
L40-RJ40-I20 - L50-RJ50	*	-0.0630533	0.0397769
L40-RJ40-I20 - L80-I20		-0.00813333	0.0397769
L40-RJ40-I20 - RJ 100		-0.0364167	0.0379258
L40-RJ40-I20 - RJ80-I20		0.0229667	0.0424023
L40-RJ40-I20 - Testigo		-0.0152833	0.0536352
L50-RJ50 - L80-I20	*	0.05492	0.0415456
L50-RJ50 - RJ 100		0.0266367	0.0397769
L50-RJ50 - RJ80-I20	*	0.08602	0.0440658
L50-RJ50 - Testigo		0.04777	0.0549597
L80-I20 - RJ 100		-0.0282833	0.0397769
L80-I20 - RJ80-I20		0.0311	0.0440658
L80-I20 - Testigo		-0.00715	0.0549597
RJ 100 - RJ80-I20	*	0.0593833	0.0424023
RJ 100 - Testigo		0.0211333	0.0536352
RJ80-I20 - Testigo		-0.03825	0.0568887

* indica una diferencia significativa.

Girasol biomasa seca de la raíz y parte aérea

Pruebas de Normalidad para PA MASA[G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que PA MASA[G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.930332	0.0288164

Prueba de Kruskal-Wallis para PA MASA[G] por DIGESTATO

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

<i>DIGESTATO</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
I 100	3	25.5
L100	6	3.5
L40-RJ40-I20	6	23.1667
L50-RJ50	5	23.4
L80-I20	5	25.3
RJ 100	6	17.8333
RJ80-I20	4	10.75
Testigo	2	36.5

Estadístico = 24.5193 Valor-P = 0.000922947

Cempaxúchitl crecimiento de la raíz

Pruebas de Normalidad para RAIZ [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que RAIZ [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.943719	0.116942

Tabla ANOVA para RAIZ [CM] por DIGESTATOS

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de RAIZ [CM] entre un nivel de DIGESTATOS y otro, con un nivel del 95% de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1153.2	7	164.743	11.49	0.0000
Intra grupos	344.028	24	14.3345		
Total (Corr.)	1497.23	31			

Pruebas de Múltiple Rangos para RAIZ [CM] por DIGESTATOS

Se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD

DIGESTATOS	Casos	Media	Grupos Homogéneos
I 100	6	0.0	X
L80-I20	3	6.53333	X
L100	4	7.625	XX
RJ 100	3	12.4333	XXX
RJ80-I20	5	13.06	X
L50-RJ50	5	13.48	X
L40-RJ40-I20	3	13.5	XX
Testigo	3	20.5333	X

El asterisco que se encuentra al lado de los 18 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
I 100 - L100	*	-7.625	5.04399
I 100 - L40-RJ40-I20	*	-13.5	5.52542
I 100 - L50-RJ50	*	-13.48	4.73169
I 100 - L80-I20	*	-6.53333	5.52542
I 100 - RJ 100	*	-12.4333	5.52542
I 100 - RJ80-I20	*	-13.06	4.73169
I 100 - Testigo	*	-20.5333	5.52542
L100 - L40-RJ40-I20		-5.875	5.96813
L100 - L50-RJ50	*	-5.855	5.24187
L100 - L80-I20		1.09167	5.96813
L100 - RJ 100		-4.80833	5.96813
L100 - RJ80-I20	*	-5.435	5.24187
L100 - Testigo	*	-12.9083	5.96813
L40-RJ40-I20 - L50-RJ50		0.02	5.70663
L40-RJ40-I20 - L80-I20	*	6.96667	6.3802
L40-RJ40-I20 - RJ 100		1.06667	6.3802
L40-RJ40-I20 - RJ80-I20		0.44	5.70663
L40-RJ40-I20 - Testigo	*	-7.03333	6.3802
L50-RJ50 - L80-I20	*	6.94667	5.70663
L50-RJ50 - RJ 100		1.04667	5.70663
L50-RJ50 - RJ80-I20		0.42	4.94208
L50-RJ50 - Testigo	*	-7.05333	5.70663
L80-I20 - RJ 100		-5.9	6.3802
L80-I20 - RJ80-I20	*	-6.52667	5.70663
L80-I20 - Testigo	*	-14.0	6.3802
RJ 100 - RJ80-I20		-0.626667	5.70663
RJ 100 - Testigo	*	-8.1	6.3802
RJ80-I20 - Testigo	*	-7.47333	5.70663

* indica una diferencia significativa.

Cempaxúchitl crecimiento de la parte aérea

Pruebas de Normalidad para PA [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que PA [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.890353	0.00337952

Prueba de Kruskal-Wallis para PA [CM] por DIGESTATOS

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

DIGESTATOS	Tamaño Muestra	Rango Promedio
I 100	6	3.5
L100	4	24.0
L40-RJ40-I20	3	21.0
L50-RJ50	5	17.3
L80-I20	3	12.8333
RJ 100	3	25.0
RJ80-I20	5	23.2
Testigo	3	10.6667

Estadístico = 21.5966 Valor-P = 0.00298057

Cempaxúchitl biomasa seca de la raíz

Pruebas de Normalidad para RAIZ MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que RAIZ MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.730627	4.23274E-7

Prueba de Kruskal-Wallis para RAIZ MASA [G] por DIGESTATOS

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

DIGESTATOS	Tamaño Muestra	Rango Promedio
I 100	6	3.5
L100	4	14.75
L40-RJ40-I20	3	10.0
L50-RJ50	5	22.0
L80-I20	3	22.6667
RJ 100	3	22.0
RJ80-I20	5	16.8
Testigo	3	30.0

Estadístico = 23.5264 Valor-P = 0.00137951

Cempaxúchitl biomasa seca de la parte aérea

Pruebas de Normalidad para PA MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que PA MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.704003	1.17919E-7

Prueba de Kruskal-Wallis para PA MASA [G] por DIGESTATOS

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

DIGESTATOS	Tamaño Muestra	Rango Promedio
I 100	6	3.5
L100	4	10.875
L40-RJ40-I20	3	16.0
L50-RJ50	5	24.0
L80-I20	3	20.8333
RJ 100	3	20.3333
RJ80-I20	5	25.4
Testigo	3	15.0

Estadístico = 22.0373 Valor-P = 0.00250304

- **Composteo**

Girasol crecimiento de la raíz y parte aérea

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para RAIZ [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que RAIZ [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

	<i>Normal</i>
DMAS	0.085567
DMENOS	0.0770168
DN	0.085567
Valor-P	0.95472

Tabla ANOVA para RAIZ [CM] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de RAIZ [CM] entre un nivel de COMPOSTA y otro, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	111.82	4	27.955	3.88	0.0115
Intra grupos	223.61	31	7.21323		
Total (Corr.)	335.43	35			

Pruebas de Múltiple Rangos para RAIZ [CM] por COMPOSTAS

Se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD			
COMPOSTAS	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	4	15.15	X
L-RJ	8	18.3	XX
RJ-I-L	8	19.15	XX
RJ	8	19.25	XX
RJ-I	8	21.45	X

El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
L-RJ - RJ		-0.95	2.73881
L-RJ - RJ-I	*	-3.15	2.73881
L-RJ - RJ-I-L		-0.85	2.73881
L-RJ - Testigo		3.15	3.35435
RJ - RJ-I		-2.2	2.73881
RJ - RJ-I-L		0.1	2.73881
RJ - Testigo	*	4.1	3.35435
RJ-I - RJ-I-L		2.3	2.73881
RJ-I - Testigo	*	6.3	3.35435
RJ-I-L - Testigo	*	4.0	3.35435

* indica una diferencia significativa.

Girasol crecimiento de la parte aérea

Pruebas de Normalidad para PA [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que PA [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.973743	0.623365

Tabla ANOVA para PA [CM] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de PA [CM] entre un nivel de COMPOSTA y otro, con un nivel del 95% de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	25.7581	4	6.43951	0.19	0.9403
Intra grupos	1035.25	31	33.395		
Total (Corr.)	1061.0	35			

Pruebas de Múltiple Rangos para PA [CM] por COMPOSTAS

Se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD

COMPOSTAS	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	4	24.525	X
L-RJ	8	24.85	X
RJ-I-L	8	25.4375	X
RJ	8	26.5625	X
RJ-I	8	26.7	X

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95% de confianza

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
L-RJ - RJ		-1.7125	5.89302
L-RJ - RJ-I		-1.85	5.89302
L-RJ - RJ-I-L		-0.5875	5.89302
L-RJ - Testigo		0.325	7.21745
RJ - RJ-I		-0.1375	5.89302
RJ - RJ-I-L		1.125	5.89302
RJ - Testigo		2.0375	7.21745
RJ-I - RJ-I-L		1.2625	5.89302
RJ-I - Testigo		2.175	7.21745
RJ-I-L - Testigo		0.9125	7.21745

* indica una diferencia significativa.

Girasol biomasa seca de la raíz

Pruebas de Normalidad para RAIZ MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que RAIZ MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.891497	0.00253953

Prueba de Kruskal-Wallis para RAIZ MASA [G] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

COMPOSTAS	Tamaño Muestra	Rango Promedio
L-RJ	8	20.875
RJ	8	15.8125
RJ-I	6	20.3333
RJ-I-L	8	14.4375
Testigo	4	16.0

Estadístico = 2.4821 Valor-P = 0.647844

Girasol biomasa seca de la parte aérea

Pruebas de Normalidad para PA MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que PA MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.940394	0.0801539

Tabla ANOVA para PA MASA [G] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de PA MASA [G] entre un nivel de COMPOSTA y otro, con un nivel del 95% de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.00602845	4	0.00150711	1.45	0.2423
Intra grupos	0.0301011	29	0.00103797		
Total (Corr.)	0.0361295	33			

Pruebas de Múltiple Rangos para PA MASA [G] por COMPOSTAS

Método: 95.0 porcentaje LSD

COMPOSTAS	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Testigo	4	0.08555	X
RJ-I-L	8	0.0949125	X
L-RJ	8	0.095825	X
RJ	8	0.117387	X
RJ-I	6	0.122433	X

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
L-RJ - RJ		-0.0215625	0.0329462
L-RJ - RJ-I		-0.0266083	0.0355859
L-RJ - RJ-I-L		0.0009125	0.0329462
L-RJ - Testigo		0.010275	0.0403506
RJ - RJ-I		-0.00504583	0.0355859
RJ - RJ-I-L		0.022475	0.0329462
RJ - Testigo		0.0318375	0.0403506
RJ-I - RJ-I-L		0.0275208	0.0355859
RJ-I - Testigo		0.0368833	0.0425333
RJ-I-L - Testigo		0.0093625	0.0403506

* indica una diferencia significativa.

Cempaxúchitl crecimiento de la raíz

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para RAIZ [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que RAIZ [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

	<i>Normal</i>
DMAS	0.176483
DMENOS	0.104277
DN	0.176483
Valor-P	0.545978

Tabla ANOVA para RAIZ [CM] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de RAIZ [CM] entre un nivel de COMPOSTAS y otro, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	8.26836	4	2.06709	0.17	0.9521
Intra grupos	198.021	16	12.3763		
Total (Corr.)	206.29	20			

Pruebas de Múltiple Rangos para RAIZ [CM] por COMPOSTAS

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>COMPOSTAS</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Testigo	3	6.43333	X
RJ	6	7.08333	X
RJ-I	3	7.66667	X
RJ-I-L	4	7.725	X
L-RJ	5	8.34	X

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
L-RJ - RJ		1.25667	4.51595
L-RJ - RJ-I		0.673333	5.44644
L-RJ - RJ-I-L		0.615	5.00287
L-RJ - Testigo		1.90667	5.44644
RJ - RJ-I		-0.583333	5.27349
RJ - RJ-I-L		-0.641667	4.81402
RJ - Testigo		0.65	5.27349
RJ-I - RJ-I-L		-0.0583333	5.69602
RJ-I - Testigo		1.23333	6.0893
RJ-I-L - Testigo		1.29167	5.69602

* indica una diferencia significativa.

Cempaxúchitl crecimiento de la parte aérea

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para PA [CM]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que PA [CM] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

	Normal
DMAS	0.143668
DMENOS	0.0990759
DN	0.143668
Valor-P	0.778936

Tabla ANOVA para PA [CM] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de PA [CM] entre un nivel de COMPOSTAS y otro, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	11.417	4	2.85426	0.77	0.5605
Intra grupos	59.3287	16	3.70804		
Total (Corr.)	70.7457	20			

Pruebas de Múltiple Rangos para PA [CM] por COMPOSTAS

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>COMPOSTAS</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
L-RJ	5	5.46	X
RJ-I-L	4	5.75	X
RJ	6	6.5	X
Testigo	3	6.73333	X
RJ-I	3	7.7	X

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
L-RJ - RJ		-1.04	2.47187
L-RJ - RJ-I		-2.24	2.98119
L-RJ - RJ-I-L		-0.29	2.73839
L-RJ - Testigo		-1.27333	2.98119
RJ - RJ-I		-1.2	2.88652
RJ - RJ-I-L		0.75	2.63502
RJ - Testigo		-0.233333	2.88652
RJ-I - RJ-I-L		1.95	3.1178
RJ-I - Testigo		0.966667	3.33307
RJ-I-L - Testigo		-0.983333	3.1178

* indica una diferencia significativa.

Cempaxúchitl biomasa seca de la raíz

Pruebas de Normalidad para RAÍZ MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0.05, no se puede rechazar la idea de que RAÍZ MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.927979	0.121967

Tabla ANOVA para RAÍZ MASA [G] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de RAÍZ MASA [G] entre un nivel de COMPOSTAS y otro, con un nivel del 95% de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0.00000168843	4	4.22107E-7	0.82	0.5304
Intra grupos	0.000008223	16	5.13937E-7		
Total (Corr.)	0.00000991143	20			

Pruebas de Múltiple Rangos para RAÍZ MASA [G] por COMPOSTAS

No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>COMPOSTAS</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
RJ-I-L	4	0.001	X
RJ-I	3	0.0013	X
L-RJ	5	0.00148	X
RJ	6	0.00158333	X
Testigo	3	0.00193333	X

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95% de confianza.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
L-RJ - RJ		-0.000103333	0.000920255
L-RJ - RJ-I		0.00018	0.00110987
L-RJ - RJ-I-L		0.00048	0.00101948
L-RJ - Testigo		-0.000453333	0.00110987
RJ - RJ-I		0.000283333	0.00107463
RJ - RJ-I-L		0.000583333	0.000980995
RJ - Testigo		-0.00035	0.00107463
RJ-I - RJ-I-L		0.0003	0.00116073
RJ-I - Testigo		-0.000633333	0.00124087
RJ-I-L - Testigo		-0.000933333	0.00116073

* indica una diferencia significativa.

Cempaxúchitl biomasa seca de la parte aérea

Pruebas de Normalidad para PA MASA [G]

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que PA MASA [G] proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.904578	0.0400406

Prueba de Kruskal-Wallis para PA MASA [G] por COMPOSTAS

Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

COMPOSTAS	Tamaño Muestra	Rango Promedio
L-RJ	5	9.3
RJ	6	9.75
RJ-I	3	14.1667
RJ-I-L	4	10.375
Testigo	3	14.0

Estadístico = 2.15048 Valor-P = 0.708105

Gráfico Caja y Bigotes