



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
(CIIEMAD)**

***VALORACIÓN DEL DIGESTATO GENERADO POR LA
DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE
MÉXICO.***

Tesis que presenta:

Lic. Daniel Alejandro Salcedo Serrano

Para obtener el grado de

***Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la
Sustentabilidad***

Directores de tesis:

**DR. LUIS RAÚL TOVAR GALVEZ
DRA. MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO**



México, D. F.

Junio 2017



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 17:00 horas del día 14 del mes de JUNIO del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIEMAD para examinar la tesis titulada:

"Valoración del digestato generado por la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México"

Presentada por el alumno:

SALCEDO
Apellido paterno

SERRANO
Apellido materno

DANIEL ALEJANDRO
Nombre(s)

Con registro:

B	1	5	0	5	6	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. LUIS RAÚL TOVAR GALVEZ

DRA. MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO

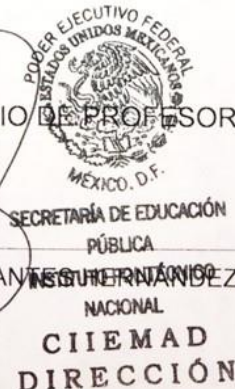
M. EN C. JAIME CASTRO CAMPOS

M. EN C. MARÍA DE LA LUZ VALDERRÁBANO ALMEGUA

DR. FABIÁN ROBLES MARTÍNEZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. VÍCTOR FLORENCIO SANTOS HERNÁNDEZ





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, el día 14 del mes de junio del año 2017, el que suscribe Daniel Alejandro Salcedo Serrano alumno del programa de Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, con número de registro B150561, adscrito al CIEMAD-IPN, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez y la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo y cede los derechos del trabajo titulado **“Valoración del digestato generado por la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: dasalcedo@live.com.mx, lrtovar@hotmail.com y/o ainegue9@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Daniel Alejandro Salcedo Serrano
Nombre y firma del alumno(a)

CREDITOS

El trabajo de investigación que sustenta esta tesis de Maestría fue realizado en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN, bajo la dirección del Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez y la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo, con el apoyo financiero de los proyectos de investigación CIEMAD-IPN proyecto SIP número 20160235 y 20170183 (2017) y SECITI/065/2016 con registro SIP-2016-RE/115. De las becas: CONACYT Septiembre 2015 a Julio 2017, estímulo institucional de formación de investigadores (BEIFI) periodo Enero – Julio 2016, agosto – Diciembre 2016 y Enero – Julio 2017.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre: Por su amor y su gran apoyo. Por enseñarme lo que significa fortaleza. Por impulsarme a concluir lo que inicio. Por creer en mí. A ella le dedico este trabajo.

A mi padre: Por ser mi guía. Por apoyarme incondicionalmente en todos mis proyectos y hacerme sentir que siempre será así.

A mi esposa Daniela: Por impulsarme a crecer como profesional y como ser humano. Porque sin su apoyo no hubiera podido realizar este proyecto. Por esperarme. Por confiar en mí. Te amo.

A mis hermanos: Porque hicieron suya la alegría de mis logros. Porque su apoyo acortó el tiempo y la distancia.

Al Doctor Luis Raúl Tovar Gálvez: Por darme la oportunidad trabajar en este y otros proyectos orientados a la mejora social y ambiental. Por su respaldo. Por enseñarme a pensar.

A la Doctora María Eugenia Gutiérrez Castillo: Por las valiosas aportaciones a este trabajo. Por sus críticas objetivas y constructivas. Porque sus acciones estuvieron siempre orientadas a promover en mí el aprendizaje como investigador y el desarrollo de mi potencial.

A mi compañera Kari Gállego: Por su amistad y apoyo a lo largo del programa. Por compartir resultados de su investigación que fortalecieron el respaldo teórico de esta Tesis. Por su amable apoyo en diversas pruebas y trabajos académicos.

A la Maestra Claudia Tapia: Por compartir sus conocimientos en diversas áreas de laboratorio de una forma paciente y bondadosa. Por confiar en mí.

Al comité tutorial: MC María de la Luz Valderrabano Almegua, MC Jaime Castro Campos y al Dr Fabián Robles Martínez. Por sus oportunas contribuciones, resultado del tiempo y la paciencia dedicados a este proyecto.

A mis compañeros: Juan Carlo Campos, Adriana Zarate y Jacobo Tabla, por su amistad. Por acompañarme en los buenos y malos momentos de esta trayectoria.

ÍNDICE

	PAGINAS
RESUMEN Y ABSTRACT	i
LISTA DE TABLAS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
GLORASIO	v
ACRÓNIMOS y ABREVIATURAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS GENERAL Y PARTICULARES	3
2. ANTECEDENTES	3
2.1 DIGESTION ANAERÓBICA DE FORSU	3
2.2 DIGESTATO. PROCESAMIENTO PARA RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES	7
2.3 FERTILIZANTES EN MÉXICO	15
3. METODOLOGÍA	28
3.1 DISEÑO DEL ESTUDIO	28
3.2 MÉTODOS DE MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATO, INÓCULO Y DIGESTATO	29
3.3 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA HÚMEDA Y SECA Y ESCALAMIENTO	36
3.4 PRUEBAS BIOLÓGICAS	49
3.5 ANALISIS ESTADÍSTICO	54
4. RESULTADOS	54
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICA DE SUSTRATO E INÓCULO	54
4.2 SEGUIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN DIGESTIÓN HÚMEDA Y SECA	56
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL DIGESTADO	62
4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	69
5.- DISCUSIÓN	71
6.-CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y PERPECTIVAS FUTURAS	77
7.- BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXO A: PRODUCTO DE INVESTIGACIÓN DERIVADO DEL TRABAJO	86
ANEXO B: PRODUCTO DE INVESTIGACIÓN DERIVADO DEL TRABAJO	87

RESUMEN

El tratamiento biológico anaerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), ha mostrado ser una alternativa costo-efectiva gracias a la producción de biogás rico en metano. En este proceso se genera un residuo equivalente al 90% del peso inicial del sustrato tratado, al que se le llama digestato. La Ciudad de México (CDMX) está próxima a contar con un digestor anaerobio con capacidad de procesar cerca del 20% de la FORSU, el proyecto definirá su rentabilidad en la medida en que el proceso sea más eficiente. En distintas partes del mundo el digestato es tratado para ser vendido y aplicado como biofertilizante en suelos de cultivo. Se trabajó con digestiones anaerobias húmedas ($ST < 15\%$) y secas ($ST > 15\%$) a escala laboratorio con muestras representativas de la FORSU de la CDMX tomadas de la Planta de Composta de Bordo Poniente, para obtener un digestato representativo.

Los digestores a escala laboratorio de 125ml y de 1,250ml mostraron un buen desempeño en términos de generación de biogás. Se encontró que una forma más acertada para la estimación de biogás generado por gramo de materia orgánica, es haciendo el cálculo con lo sólidos volátiles después de que se les resta la lignina presente (SVLL). La FORSU inoculada con escurrimiento de las pilas de composta madura de la PCBP genera aproximadamente 462ml de biogás/g SVLL. En promedio se consumió el 70% de los SVLL disponibles en los digestores. El pH del digestato fue en promedio de 8.3 en todos los casos. Se encontró que por cada kg de digestato en base seca, hay 5.35% de NTK, del cual, 71% en promedio es de fácil absorción para las plantas ($\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$), también se encontró que este contiene 3.54% de potasio y 0.8% de fósforo. Así mismo se cuantificaron otros elementos que tienen carácter de micro nutriente en temas de nutrición vegetal, que fue el caso del Ca con 5.42% y Mg con 0.83%. En cuanto a metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg y Ti) y parámetros sanitarios de manejo y aplicación de composta, (coliformes fecales, salmonella *spp.* y huevos de helminto) se obtuvieron cantidades muy por debajo de la NADF-020-AMB-2011. En pruebas de fitotoxicidad y desarrollo vegetal, se encontró que el suelo tratado con digestato (51g diluidos en 150ml aplicados a 3kg de suelo) promueve significativamente ($P < 0.05$) la germinación de las semillas de lechuga (*Lactuca sativa var. crispata*) comparado con lo observado en suelo con tratamiento de composta, suelo fertilizado y suelo solo. Por otro lado, en cuanto al desarrollo de plantas de lechuga, aquellas con suelo tratado con digestato y con fertilizante comercial, mostraron una ligera fitotoxicidad al obtener valores por debajo de las plantas en suelo solo (blanco negativo). Es probable que haya una sensibilidad al amonio-amoniaco por parte de las plantas de lechuga, por lo cual, hace falta trabajar en un diseño experimental más robusto con distintas cantidades del tratamiento y distintas plantas.

Palabras Clave: Biofertilizante, Digestato, Digestión anaerobia seca, Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), Nitrógeno Fósforo y Potasio (NPK).

ABSTRACT

The biologic anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), has shown to be a cost-effective alternative due to the methane rich biogas that it produces. In this process, about 90% of the initial weight of the organic waste treated becomes a residue, which is called digestate. Mexico City is prompt to have an anaerobic digester capable of treating approximately 20% of its total OFMSW, this project will define its profitability depending on the efficiency of the process. Around the globe, the digestate is already being treated by some companies as a bio fertilizer with high value for crops nourishment. In this investigation we worked with wet (ST<15%) and solid (ST>15%) digestions on a lab scale using representative samples of the OFMSW from México City, taken from the Compost Plant located in “Bordo Poniente”(CPBP), this, to ensure a better representability of a digestate sample.

The lab scale digesters of 125ml and 1,250ml showed a good performance in terms of biogas generation. During this process it was found that the estimation of biogas generation based on the “free from lignin” volatile solids (FFLVS) was more accurate, showing a better correlation in terms of biogas ml per gram of organic matter than the classic “Biogas ml/gVS” scale. The OFMSW inoculated with the effluent of mature compost piles taken from the CPBP, produces around 462ml of biogas per gram of FFLVS. In average, 70% of the available FFLVS were consumed during the digestions. The reported pH of the digestate was around 8.3 in all cases. Based in dry weigh, there is 5.35% of total Kjeldahl nitrogen per kg of digestate. 71% of this nitrogen is in readily available form for most plants ($\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$). 3.54% of the digestate was composed of potassium and 0.8% of phosphorus. Other important micronutrients were found, such is Ca with 5.42% and Mg with 0.83%. As for heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg and Ti) and sanitary handling parameters (fecal coliformes, salmonella *spp.* and parasite’s eggs) the results reported a very low presence of both values according to the local norm NADF-020-AMB-2011. The phytotoxic test and the vegetable growth test, showed that soil treated with digestate (51g diluted in 150ml of deionized water applied in 3kg of soil) can significantly ($P<0.05$) promote the germination of lettuce seeds when compared with other soil treatments like, compost, commercial fertilizer and soil with no treatment. On the other hand, the result of the growth of lettuce plant treated with digestate and commercial fertilizer, showed a mild phytotoxic effect on the lettuce plants (*Lactuca sativa var. crispata*). This was concluded after observing that the lettuce, with this two treatments, had lower development than the other 2 treatments; soil with no treatment (Blank Negative) and compost treatment. It is probable that the lettuce is sensible to ammonia-ammonium compounds, so future work needs to be done with different quantities and different plant species.

Key words: Bio fertilizer, Digestate, Dry Anaerobic Digestion, Organic Fraction of the Municipal Solid Waste, Nitrogen, Phosphorus and Potassium (NPK).

LISTA DE TABLAS

NÚMERO		PÁGINA
1	Características fisicoquímicas de digestatos obtenidos en DA en distintas partes del mundo	10
2	Niveles máximos permisibles de metales pesados en suelo BS por país.	11
3	Reacciones bioquímicas del procesamiento de aminoácidos por la clase Clostridia que resultan en amoníaco.	14
4	Precios publicados por fabricantes de FN a la segunda quincena de enero 2017	17
5	Precio promedio en pesos por tonelada publicados por fabricantes de FF a la segunda quincena de enero 2017	19
6	Precio promedio en pesos por tonelada publicados por fabricantes de FF a la segunda quincena de enero 2017	20
7	Principales cultivos que ocupan mayor superficie en hectáreas de Texcoco, Xochimilco, Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad al 2015.	24
8	Estimación de costo por viaje redondo para traslado de digestato a zonas con fuerte actividad agrícola alrededor de la CDMX.	27
9	Métodos para la evaluación de parámetros fisicoquímicos y biológicos	32
10	Valores iniciales de la preparación de inóculo con ajuste de pH.	42
11	Seguimiento de pH y ORP del inóculos aclimatados durante los días 15, 20, 25 y 36	42
12	Seguimiento de producción de biogás en viales con 30% y 50% de inóculo.	43
13	Variable de proceso del día 0 y 45 de incubación.	43
14	Valores de la caracterización fisicoquímica inicial del suelo.	51
15	Prueba de germinación de semillas de lechuga, acelga y espinaca.	52
16	Caracterización de digestato, fertilizante y composta.	53
17	Características fisicoquímicas del sustrato (FORSU) por temporada	54
18	Caracterización de muestras de efluentes sin pre-incubar	55
19	Comparación y caracterización físico-química de efluente incubado para su uso como inóculo en la DA	55
20	Correlación en la producción de biogás por temporadas estacionales respecto a los sólidos volátiles libres de lignina, en sistema de DA húmedo.	59
21	Caracterización del digestato de inóculo con sustrato de la PBM (Digestión humedad) en temporada seca y temporada de lluvias.	63
22	Características físico-químicas de mezclas de inóculo y sustrato procesadas por DA seca con diferentes tratamiento de álcalis.	63
23	Características físico-químicas de la mezcla de ICOH más sustrato 1:1w/w procesada por DA seca, escalada a 1,250ml y del digestato resultante	64
24	Caracterización fisicoquímica del digestato deshidratado.	65
25	Valores detectados de metales pesados de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT.2002 “excelentes mg/kg en base seca” y la NADF-020-AMBT-2011 calidad A.	66
26	Comparación de germinación con distintos tratamientos.	68
27	Digestato de digestiones secas con ICOH. 125ml y 1,250ml.	69
28	Desarrollo de plantas de lechuga con distintos tratamientos de fertilización.	70
29	Comparación de la media de los parámetros físico-químicos reportados por varios países europeos contra los encontrados en el digestato de este trabajo.	72

LISTA DE FIGURAS

NÚMERO		PÁGINA
1	Carácter multifase de la digestión anaeróbica	4
2	Movimiento de nutrientes en el digestato al término del proceso de la DA.	15
3	Demanda vs capacidad de producción interna de fertilizantes N, P ₂ O ₄ y K ₂ O	16
4	Imágenes satelitales Landsat 8 destacando actividad agrícola. Ciudad de México y área conurbada marzo 2015.	23
5	Ruta de viaje CEDA-Norte de Xochimilco	26
6	Ruta de viaje CEDA-Sur de Valle de Chalco Solidaridad	26
7	Ruta de viaje CEDA-Centro de Tláhuac	26
8	Ruta de viaje CEDA-Oeste de Texcoco	27
9	Diagrama de diseño del estudio	28
10	Esquema del muestreo y preparación de cuarteo.	30
11	Toma de muestra por estratificación	31
12	Toma de muestra de efluente del canal que alimenta al cárcamo	31
13	Toma de muestra de efluente, canal a la base de la comporta madura	31
14	Ejemplo de vial ensamblado con sustrato e inóculo en relación 1:1.	37
15	Desplazamiento de embolo por la presión de la generada la digestión en viales.	38
16	Recipientes de plástico con y sin bolsa ziplock en Incubadora.	41
17	Recipientes de litro ensamblados dentro de incubadora a 55°C.	45
18	Componentes más importantes del reactor en frascos de cultivo.	46
19	Medición de biogás por método de desplazamiento de agua.	47
20	Clave de identificación de huevos de helminto. Dibujo por María Laura Vignau.	49
21	Distribución aleatoria de 12 unidades experimentales en maceta con sistema de riego de goteo por gravedad.	49
22	Comparación de producción de biogás de la PBM entre temporada seca y de lluvias en proceso de DA húmedo.	57
23	Producción de biogás en viales con inóculo aclimatado usando Ca(OH) ₂ y NaOH.	60
24	Regresión Lineal con datos de PBM en temporada de lluvias, digestión seca con tratamiento NaOH y digestión seca tratada con Ca(OH) ₂ usando datos del I/S, BP+ y BN-.	61
25	R1, R2 y R3: Digestor en recipiente 1, digestor en recipiente 2 y digestor en recipiente 3 respectivamente.	62
26	A. Crecimiento no característico de salmonella spp, B. 3 medios distintos de cultivo para salmonella spp.	66
27	Día 19 después de la primera semilla germinada en maceta.	68
28	Desarrollo de las lechugas por tratamiento al día de corte.	69
29	Gráfica comparativa de medias de las características del digestato generado en el CIEMAD y el reportado en la bibliografía.	73

GLOSARIO

Aprovechamiento – Es el uso de la FO digerida y estabilizada, como mejoradores o acondicionadores de los suelos por su contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio.

Biogás – Gas obtenido por la degradación anaerobia de residuos orgánicos mediante bacterias, que se puede utilizar como combustible.

Biomasa –Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Composta – Resultado del proceso de degradación bioquímica, de un sustrato orgánico, sólido y heterogéneo, en condiciones aerobias y durante el cual se presenta al menos una etapa termófila.

Efluente – Líquido proveniente de material orgánico, el cual se forma por reacciones hidrolíticas o de percolación. Contiene sólidos disueltos o en suspensión en baja concentración.

Estabilización – Procesos físicos, químicos y biológicos a los que se somete un material orgánico, para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente.

Fertilizante – Compuesto orgánico o inorgánico que, abona, estercola y fructifica, refiriendo al cultivo de las plantas o la producción de la tierra.

Fitotoxicidad – Presencia de sustancias que influyen negativamente en el desarrollo y crecimiento vegetal.

Macronutriente - Aquellos minerales que la planta requiere en mayor proporción para cubrir sus necesidades fisiológicas y completar su ciclo de vida. Se consideran macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), Magnesio (Mg) y azufre (S).

Mejorador de suelo - Compuestos de origen orgánico que al agregarse al suelo modifica las condiciones físico-químicas y biológicas del mismo, facilitando a las plantas la obtención de agua y nutrientes.

Micronutriente – Sustancias que las plantas necesitan en pequeñas dosis. Son sustancias indispensables para los diferentes procesos metabólicos de los organismos vivos como Zn, Cu, He, Se.

Residuo orgánico - Son aquellos que están compuestos por desechos de origen biológico.

Residuos inorgánicos - los que no tienen origen biológico sino industrial o artificial.

Valorización - Reconocimiento y/o apreciación económica en base al valor potencial de algo.

ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

SIGLAS	DESCRIPCIÓN
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
BH	Base húmeda
BN-	Blanco Negativo
BP+	Blanco Positivo
BS	Base Seca
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Calcio
CDMX	Ciudad de México
CE	Conductividad Eléctrica
CEDA	Central de Abasto de la Ciudad de México
CF	Coliformes Fecales
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CV	Coefficiente de Variación
DS	Desviación Estándar
FF	Fertilizantes Fosforados
FN	Fertilizantes Nitrogenados
FO	Fracción Orgánica
FORSU	Fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
FP	Fertilizantes con Potasio
HT	Humedad Total
I/S	Mezcla Inóculo con Sustrato
KT	Potasio total
N ₂	Nitrógeno inerte
NAD-DF-020-2011	Norma ambiental del Distrito Federal de Composta
NaOH ⁺	Hidróxido de Sodio
NH ₃	Amoniaco
NH ₄ ⁺	Amonio
NPK	Nitrógeno, Fósforo y Potasio
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
ORP	Potencial de Oxido-Reducción
PBM	Prueba de Bio Metanización
PCBP	Planta de Composta de Bordo Poniente
PCI	Poder Calorífico Inferior
PF	Pemex Fertilizantes
pH	Potencial de Hidrógeno
PO ₄ ⁻³	Fosfatos Totales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
SVLL	Sólidos Volátiles Libres de Lignina
ZMCDMX	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

1 INTRODUCCIÓN

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) es una atractiva materia prima para plantas de digestión anaeróbica (DA), en distintas regiones del mundo este método de tratamiento biológico de desechos ha expandido rápidamente su aplicación porque ayuda a estabilizar los residuos, aporta una ruta de recuperación de energía limpia (biogás) y genera un residuo (digestato) que puede ser aplicado efectivamente como acondicionador de suelo o fertilizante orgánico (Khalid et al. 2011; Möller y Müller, 2012; De Baere y Mattheeuws, 2013; Chatterjee y Mazumder, 2016). La sustentabilidad del proceso de DA depende no solo de una buena producción de biogás sino también del apropiado manejo y uso que se logre del digestato (Alburquerque et al., 2012).

La mejor opción de uso del digestato parece ser la de biofertilizante, ya que, se reporta que contiene cantidades considerables de carbón orgánico residual, macro y micronutrientes (Möller y Müller, 2012), sin embargo, su valorización depende de su calidad que puede variar ampliamente debido al contenido final de los nutrientes que se retienen durante el proceso. Las características de residuo remanente de la DA dependen importantemente del sustrato orgánico que se alimenta al digestor, del tipo de tecnología que se seleccione para la obtención del biogás, así como de los parámetros operacionales del proceso (Al Seadi y Lukehurst, 2012; Risberg, 2015).

Desde hace varias décadas, en diversas regiones del mundo se hace uso del beneficio agronómico del digestato, pero su promoción como una nueva fuente de recuperación de nutrientes es mucho más reciente debido a que existen distintas opiniones respecto a los efectos de aplicar el digestato como fertilizante, especialmente en lo relacionado a su contenido de nitrógeno, la información reportada de prácticas y experiencias existentes son en algunos casos ambiguas y en otras contradictorias (Al Seadi et al., 2008; Vaneckhaute et al., 2017).

La popularidad de la DA ha crecido desde los años 1970 debido al alza de los precios de la energía y a la creciente preocupación por el perjudicial impacto de los combustibles fósiles en el calentamiento global. Particularmente, su aplicación en el tratamiento de la FORSU ha sido lenta a pesar de sus potenciales beneficios, de manera exitosa y continua se han operado digestores anaeróbicos para este tipo de residuos desde los años 1980, pero la mayoría de los sistemas desarrollados son más recientes. Actualmente, diversas regiones del mundo ya tienen en operación plantas de DA a escala comercial, pero existen muchas otras regiones que no han logrado su exitosa aplicación debido probablemente a los altos costos de inversión inicial, a la poca familiarización que se tiene con la tecnología y/o a la falta de directrices políticas e incentivos que la coloquen como una alternativa de solución al manejo de la FORSU (Nkoa, 2014).

Tomando en consideración que la DA ha mostrado una importante contribución en la mejora de prácticas de manejo de los RSU, que en muchos aspectos es una tecnología madura, con alto costo-efectividad debido a la alta recuperación de energía ligada al proceso, su limitado impacto ambiental y que desde el punto de vista tecnológico es una tecnología de valorización bioenergética ambientalmente competitiva (De Meester et al., 2012), esta se encuentran en etapa de planeación y construcción de plantas de DA, a distintas escalas, para el tratamiento de FORSU alrededor de distintos lugares del mundo, tal es el caso de la Ciudad de México (CDMX).

Hoy en día, el gobierno de la CDMX en su política de manejo de residuos sólidos urbanos tiene comprendida la revalorización de la FORSU, misma que corresponde al 40% de aproximadamente 12,000 toneladas día de RSU que se generan en la Ciudad (Tovar et al., 2012), un gran reto a lograr sobre todo sí se reconoce que actualmente no se cuenta con relleno sanitario local, por lo que debe de disponer de los residuos en rellenos sanitarios del Estado de México y Morelos. Lo anterior se logra a un gran costo; un estudio hecho por Tovar y Gutiérrez (2014) del 2011 al 2014 permitió calcular que el costo de traslado, entrega y disposición por cada tonelada de fracción inorgánica en dichos rellenos sanitarios era de \$336.15 pesos, por otra parte, el traslado entrega y disposición a plantas de compostaje es de \$282.09 para residuos de poda y \$196.67 para residuos de comestibles. Por su parte, fuentes locales oficiales reportaron que al 2015 el costo era entre \$550.00 y \$580.00 pesos por tonelada de fracción inorgánica (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2015). Lo que anualmente representa alrededor de \$1,700,000,000.00 pesos al año erogados del gobierno local y federal solo en la CDMX para el manejo y disposición de los RSU sin considerar nóminas

Dentro del mismo programa de “Basura Cero” se contempla un proyecto que para al 2018 la CDMX procese también su FORSU en una planta de digestión anaerobia (Gaceta Oficial, 2014). En febrero del 2016 se anunció en medios de comunicación nacionales la construcción de un digestor anaerobio (El más grande del mundo) en la CDMX que tratará mínimo 650,000 toneladas al año de la FORSU. El 20 de junio del mismo año, se celebró la aprobación del Fideicomiso para la Construcción y Operación de la Central de Abasto de la CDMX para ceder 2 hectáreas de su terreno exclusivamente para la construcción de un digestor anaerobio (FICEDA, 2016). Con la anunciada construcción de un digestor que tratará un residuo, surge la preocupación por la generación de otro residuo (digestato).

En este contexto, el presente trabajo aporta información de las características químicas, físicas y biológicas del digestato producido durante la biodigestión anaeróbica de la FORSU de la CDMX, utilizando un sistema de digestión anaeróbica húmeda y seca en lote a escala laboratorio, con alta producción de biogás, para valorar su potencial uso agrícola.

Hipótesis

El digestato producido por la digestión anaerobia de la FORSU de la CDMX tiene la calidad suficiente para ser valorado como fertilizante.

Objetivo general

Evaluar las características físicas, químicas (macro/micro nutrientes, materia orgánica, salubres y metales tóxicos) y de estabilidad del digestato generado de la digestión anaerobia de la FORSU de la CDMX y valorar su potencial aprovechamiento como biofertilizante.

Objetivos particulares Muestrear y caracterizar fisicoquímicamente el sustrato (FORSU de la CDMX) y el lixiviado de las pilas de composta madura de la planta de composta Bordo Poniente a usar en la digestión anaeróbica, en temporada de lluvias y temporada seca del año.

1. Ensamblar sistemas de DA termófila, seca y húmeda, en lote a escala laboratorio con seguimiento de producción de biogás y procesar muestras de FORSU de la CDMX.
2. Determinar y comparar las propiedades fisicoquímicas del digestato derivado de la digestión anaeróbica termófila seca y húmeda de la FORSU de la CDMX.
3. Escalar el proceso de digestión anaeróbica seca optimizado, obtener muestras de digestato y determinar sus propiedades fisicoquímicas, de patogenicidad y fitotoxicidad, para valorarlas en términos de nutrición vegetal.
4. Analizar el contexto regulatorio, costos de manejo distancia y tiempo de circulación de camiones de carga desde la CEDA hasta distintas zonas con actividad agrícola en la periferia de la CDMX, para valorar su potencial uso agrícola.
5. Practicar pruebas de efectividad biológica del digestato como fertilizante para nutrición vegetal.

2. ANTECEDENTES

2.1 Digestión anaerobia de la FORSU y el digestato.

La DA de la FORSU se considera como una solución biotecnológica exitosa para tratamiento y aprovechamiento de desechos, ligada a la producción de energía dada la rentabilidad que ofrece al generar metano cuyo poder calorífico superior es de 37,061.5 kJ/m³ y 33,380.0 kJ/m³ de poder calorífico inferior (similar al del gas butano PCI 39,900 kJ/m³), proporciona además otros beneficios ambientales como la mitigación de gases efecto invernadero, estabilización de residuos sólidos con altos contenidos de nutrientes y la aplicación en suelos agrícolas (Gooch y Ludington, 2005; Karthikeyan y Visvanathan, 2013; Mao et. al., 2015).

Conceptualmente, la DA se puede describir como un proceso microbiano de biotransformación de material orgánico en ambiente anóxico (libre de oxígeno), de carácter dinámico y multifactorial en el que intervienen e interactúan mezclas complejas de consorcios microbianos simbióticos de diferentes especies de bacterias y arqueas anaerobias estrictas o facultativas, generando como productos principales biogás (CO₂, CH₄, H₂O y otros gases a niveles traza), además de digestato (biomasa microbiana, material orgánico parcialmente o no degradado y material inorgánico). Si bien se desarrolla en múltiples y secuenciales fases, se identifican 4 principales tipos de eventos bioquímicos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Figura 1), el balance de las reacciones en cada fase es crítico para asegurar una rápida y estable digestión (Wilkie, 2005; Ludington et al., 2013 Venkiteswaran et al., 2015).

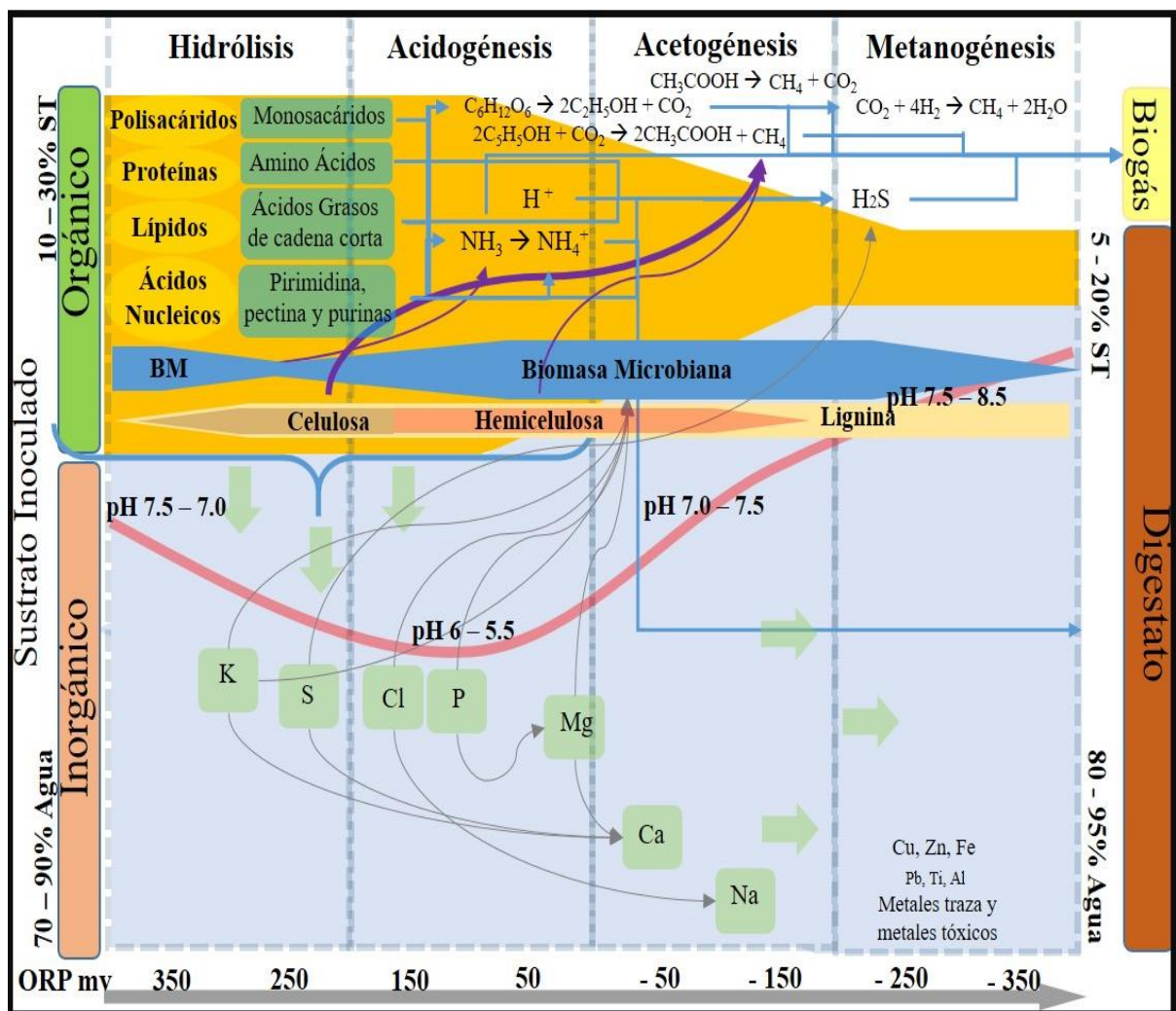


Figura 1. Carácter multifase de la digestión anaeróbica (Möller y Müller, 2012; Rittman y McCarty, 2001; Molino et al., 2013; WRAP, 2010 y PAS 110:2014).

En cada una de estas fases tienen lugar una serie de reacciones en las que se degradan diferentes tipos de compuestos (Rittman y McCarty, 2001; Molino et al., 2013):

Fase 1 Hidrólisis. En esta fase, las enzimas extracelulares secretadas por bacterias hidrolíticas, hidrolizan los polímeros y oligómeros de las macromoléculas (carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos) presentes en la materia orgánica formando monómeros (azúcares, amino ácidos, ácidos grasos y purinas). Al romperse las membranas celulares, se libera el agua que éstas pudieran contener. El proceso de la hidrólisis a su vez es precursor de la formación de ácidos grasos volátiles (AGV) y de cambios en el pH de la mezcla sustrato/inóculo.

Fase 2 Acidogénesis o fermentación. En este segundo paso, las bacterias fermentativas o acidogénicas (principalmente del género *Clostridium*) continúan la degradación de los monómeros produciendo ácidos grasos de cadenas cortas (ej. ácido acético, propiónico y butírico), alcoholes, lactato, succinato, gas hidrógeno, CO₂ y amoníaco; se propicia un ambiente ácido (pH 5 aproximadamente) y el empleo del hidrógeno disuelto en el ambiente como fuente principal de energía de las bacterias hidrogenotróficas.

Fase 3 Acetogénesis. Los AGV, los alcoholes y azúcares son convertidos ácido acético y posteriormente a acetato por bacterias acetogénicas, mismo que después será descompuesto en H₂ y CO₂. El hidrógeno producido será de nuevo consumido por bacterias acidogénicas y bacterias metanógenas que pertenecen al dominio de las arqueas.

Fase 4.- Metanogénesis. En esta última fase, compuestos como acetato, metanol, etanol e hidrógeno, se emplean para producir energía y como donadores de electrones que ayudan a reducir el CO₂ (que sirve como receptor de electrones en la cadena y como única fuente de carbono para las arqueas) y liberar CH₄. Esto ocurre por la acción de arqueas bacterias metanogénicas que son hidrogenotróficas y acetoclásticas.

Las fases de hidrólisis y acidogénesis se consideran las más rápidas, mientras que la metanogénesis está identificada como el paso limitante de la velocidad del proceso, en general las comunidades microbianas son sensibles a cambios en las condiciones ambientales que tienen lugar dentro del proceso, por esta razón se hace necesario seleccionar y diseñar los bioreactores, además de controlar parámetros ambientales clave como temperatura, pH, concentración de ácidos volátiles, capacidad amortiguadora del medio, potencial oxido-reducción, la presencia de sustancias tóxicas e inhibitorias del desarrollo microbiano (Karthikeyan y Visvanathan, 2013).

2.1.1. Tecnologías de digestión anaeróbica.

Diversos tipos de tecnología de DA se han aplicado a nivel industrial desde hace más de 30 años en algunos países. Para el año 2014, aproximadamente el 60% de los digestores instalados en el mundo se encontraban en Europa. Países como Alemania (75.5%), Italia (4.1%) Holanda, (3.9%), España (1.4%) y Francia (1.3%) encabezan la lista en plantas instaladas y en

funcionamiento por país. El éxito de estos sistemas radica en la selección correcta de componentes críticos del proceso anaeróbico como lo es el diseño del reactor. Particularmente el progreso de la biotecnología anaeróbica para la producción de energía ha conducido al diseño y configuración de distintos tipos de digestores anaerobios para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de biogás. El desarrollo tecnológico de los sistemas de DA se enfoca en la permanente necesidad de construir y operar reactores costo-eficientes, energéticamente eficientes, confiables y capaces de producir efluentes de alta calidad (Khalid et al. 2011).

Existen en el mercado mundial diversos tipos de digestores anaerobios para el tratamiento de FORSU, su diseño se enfoca en el control de parámetros fisicoquímicos clave para la eficiencia del proceso, generalmente las plantas de biodigestión integran uno o más tipos de estos digestores con el objetivo central de simplificar las maniobras de operación. A continuación, se presenta la clasificación genérica de los digestores en relación al tipo de alimentación del digesto, a la temperatura del proceso, humedad y número de fases con las que trabaje (Monson et al., 2007; Khalid et al. 2011).

1. Por la temperatura al que tiene lugar el proceso se tienen digestores:
 - a. Psicrófilos entre 5°C y 20°C
 - b. Mesófilos entre 30°C y 40°C
 - c. Termófilo entre 45°C y 60°C.
2. Considerando la humedad y contenido de sólidos totales
 - a. Digestores secos con sólidos totales mayores al 15%
 - b. Húmedo con sólidos totales igual o menores al 15%.
 - c. Semi húmedos sí los ST se encuentran en el rango entre 10 – 25%
3. Por el número de fases o pasos por los que pasa el sustrato.
 - a. De una fase, digestor en el que se llevan las 4 fases de la DA en un solo contenedor
 - b. De dos fases, digestor que requiere de dos recipientes en el que se dividen las 4 fases de la DA.
4. Por cómo se alimenta la materia prima
 - a. En lote, solamente al inicio.
 - b. Continuo, se le llama así a un digestor que constantemente se está alimentando y al mismo tiempo se le extrae biogás y la fracción que ya fue digerida.

Muchas compañías ofrecen distintas tecnologías de tratamiento de FORSU con distintos tipos de arreglos de digestores, específicamente para el proyecto que se pretende promover en la CDMX no se tiene mucha información sobre las empresas que licitarán para la construcción del digestor anaerobio. Se habla de que al menos uno de ellos se especializa en digestores anaerobios-secos-termófilos-de una fase (Kothari et al., 2014). Esta última consideración se ha tomado en cuenta para el diseño experimental de la tesis.

2.2 Digestato. Procesamiento para recuperación de nutrientes.

Bajo condiciones controladas el proceso de DA tiene el potencial de generar además de importantes cantidades de biogás, un producto con presumible utilidad para el acondicionamiento de los suelos “el digestato”. Una alta proporción de los países que utilizan hoy en día la DA para tratamiento de la FORSU han enfocado sus esfuerzos al tratamiento del producto de la digestión anaerobia (Urbini y Raboni, 2014). En virtud de que algunos componentes en los residuos como compuestos orgánicos recalcitrantes, elementos metálicos, macro y micronutrientes no son biodegradados, el residuo los contendrá; la aplicación del digestato a campos agrícolas requiere del conocimiento de las características fisicoquímicas para determinar si se pueden aprovechar los nutrientes que este digestato pueda contener.

El digestato es relativamente un producto nuevo, se encuentra en etapa de exploración su valoración como nueva fuente aportadora de nutrientes, debido a que los resultados que se tienen de su aplicación en campos agrícolas y de los cambios que produce en la microbiota del suelo que son aún recientes y en muchos de los casos contradictorios, por este motivo se requieren desarrollar más investigaciones enfocadas a documentar su valor como fertilizante, establecer el marco regulatorio para su aplicación y sus mercados potenciales.

Diversos autores han propuesto que la fracción orgánica del digestato puede contribuir a aumentar la materia orgánica del suelo, ya que, puede influir y corregir las características químicas, físicas y biológicas de los suelos agrícolas, dado que contiene una alta proporción de nitrógeno mineral especialmente en la forma de amonio-amoniaco (especie química disponible para las plantas), además contiene macro y micro elementos necesarios para el crecimiento vegetal. Pero hay muy poca información disponible del grado de estabilidad de los digestatos, de la dinámica C y N en la recuperación de suelos, de la descomposición que sufre el digestato en los suelos tratados (ej. mineralización del material orgánico, mineralización-inmovilización y disponibilidad del nitrógeno). Por estas razones, es importante definir las principales propiedades del digestato que afecten la dinámica C y N del suelo y que permitan el uso sustentable de los digestatos como fertilizantes en agricultura, así como determinar sus beneficios ambientales (Alburquerque et al., 2015).

El producto residual de la digestión anaerobia y denominado digestato, es entonces una mezcla de biomasa microbiana, de material orgánico no digerido y de macro nutrientes como N, P, K, Ca, S y Mg y micronutrientes como B, Cl, Mn, Fe, Zn, Cu, Mo y Ni que estaban en la materia orgánica original, que fueron retenidos y permanecieron en más de un 90 %, durante el proceso, se trata también de un residuo que se produce en grandes cantidades durante la DA (WRAP, 2010; PAS 110:2014).

Debido a que los reactores anaeróbicos pueden operar con diferentes tipos de residuos orgánicos (ej. excretas, residuos agrícolas, desechos de industria de alimentos, efluentes municipales y FORSU), con diferentes tipos de inóculos (difieren en las comunidades microbianas que realizan el proceso), que algunas veces se usan aditivos que contienen metales traza que pueden ser tóxicos y que el régimen de operación de la planta puede variar, luego entonces se entiende que la composición química puede variar y con ella la calidad del digestato (Monlau et al., 2015; Risberg, 2015).

El digestato físicamente está integrado de una fracción líquida y otra sólida, actualmente muchas plantas de DA separan mecánicamente estas dos fracciones, las almacenan y transportan por separado. La fracción líquida retiene la mayor parte de N y K, mientras la fracción sólida retiene grandes cantidades de fibras residuales y P; es esta una de las razones por las que el uso de digestato ha perdido interés, además que debe ser almacenado, transportado y no puede ser utilizado inmediatamente en el campo. Como resultado, cualquier país que desee instalar una planta de DA requiere de ubicar países o regiones a nivel mundial que cuenten con mayor experiencia en el uso de digestores anaerobios, así como el uso y tratamientos del digestato.

Por otra parte, la normatividad en torno a la composición del digestato, aún se encuentra en desarrollo, y para México actualmente no existe alguna norma oficial que indique los valores máximos permisibles ni procedimientos para el uso y aprovechamiento del digestato. Sin embargo, existen manuales y documentos que hablan de “reglas” de buen uso y sugerencias de aplicación, aparte, en las áreas donde se le da uso, se utilizan las normas locales de productos que se aplican al suelo haciendo énfasis en cantidad de metales pesados, salmonella spp, coliformes fecales y huevos de helminto.

En países donde ya existen instaladas plantas para procesamiento de FORSU y generación de biogás, se han preocupado por el tratamiento del digestato (Urbini y Raboni, 2014), dicho tratamiento se da con el objetivo adecuar las características fisicoquímicas de dicho residuo para poder aplicarlo al campo y así aprovechar los nutrientes que este digestato pueda contener. En forma general se observa que los tratamientos pueden consistir en acidificación, concentración, separación de fracción sólida y líquida, floculación y compostaje entre otros (Zamanzadeh et al., 2016). En la Tabla 1 se muestra una comparación de algunas características fisicoquímicas del digestato generado por 74 digestores anaerobios en 7 países en distinto periodo.

Para la interpretación de los datos recabados se utilizó el promedio y la desviación estándar de los mismos, con lo que finalmente, se calculó la media de los promedios para así calcular el coeficiente de variación, el cual permitió destacar la diferencia entre digestatos. Cabe mencionar que el digestato de las plantas consideradas en la Tabla 1 varía en el origen, es decir, algunos son el resultado de la digestión de residuos agrícolas, otros de digestión de sangre con

biosólidos, otro del uso de FORSU y otros varios materiales orgánicos, con ello los resultados pueden tener notable diferencia, por lo cual debe entenderse que dicha tabla sirve para ilustrar una tendencia en composición fisicoquímica del digestato, que servirá para después ser comparada con los datos de este trabajo.

De la Tabla 1 se puede apreciar que, el digestato muestra una tendencia en cuanto a valores de ST, HT, SV, pH, NT, P y K, donde, la humedad es relativamente alta, los SV suelen ser alrededor de la mitad de los ST, el pH por lo general tienen un valor de 8 y de los tres macro nutrientes N, P, K, el más abundante es el N, seguido por el K y por último el P. Por otro lado, los metales pesados se mantienen en cantidades relativamente bajas.

Otro grupo de parámetros que deben controlarse en el digestato es la presencia de microorganismos patógenos, específicamente para el caso de la *salmonella spp*, los coliformes fecales y los huevos de helminto, se sabe que cuando la digestión fue termófila las unidades formadoras de colonias darán valores bajos o aparentemente nulos. Esto debido a la temperatura de 55 – 65°C a la que se expone la materia orgánica por 20 hasta 45 días en este tipo de digestores, y que inhibe la reproducción y proliferación de dichos organismos que no están adaptados a dichas condiciones. Por lo anterior es que se creó que usualmente no se reportan dichos valores (Raven y Gregersen, 2007).

En la Tabla 2 se muestra los niveles máximos permisibles de metales en compostas y mejoradores orgánicos de suelo, que pueden ser aplicados a suelo por país. Algunas regiones hacen análisis del suelo al cual se le aplicara el digestato como nutrición vegetal para evitar toxicidad de nutrientes, es decir, que se sature el suelo con algún nutriente en especial. En esta tabla es posible observa la amplia variación que tienen los metales en el suelo de las distintas regiones, para México es necesario contar con este tipo de información sobre todo si se desea utilizar el digestato que se produzca en posibles plantas de biodigestión.

Tabla 1. Características fisicoquímicas de digestatos obtenidos en DA en distintas partes del mundo.

Fuente	Lugar	Año	Sustrato	N	ST	pH	SV	Lign	MJ	NTK	P	K	Mg	Fe	Ca	Co	Mo	Ni	Se	Zn	Cu	Pb	Cd	Hg	As	Mn
					g/kg			g/kg BH						mg/Kg BS												
Möller, 2016	Alemania	2016	R-Alim Agro FORSU	5	217.4	-	58.6%	-	-	7.53	1.76	3.76	1.2	-	-	-	-	12.4	-	204	47.46	14.8	0.36	0.09	-	-
					±206	-	±1.6%	-	-	±2.8	±1.4	±1.86	±1.1	-	-	-	-	±3.3	-	±89.4	±21.1	±8.5	±0.1	0.02	-	-
CEMAG REF, 2011	Francia	2011	FORSU	2	202	-	56%	-	-	3.86	-	-	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Austria		Agro	2	53	-	-	-	-	4.4	1.7	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bélgica		Agro	2	67	7.6	-	-	-	4	1.6	3.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Banks, 2013	Reino Unido	2013	FORSU	24	60.7	8.10	63%	-	14.8	5.32	-	-	-	11.5	-	8.3	5.7	27.3	0.9	-	-	-	-	-	-	-
					±48.3	±0.35	±13%	-	±5.3	±2.4	-	-	-	±15.3	-	±9.2	±5.3	±46	±0.8	-	-	-	-	-	-	-
Forster, 2007	España	2005	FORSU	6	278.5	8.50	25%	-	-	1.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
					±10.0	±0.05	±1.72	-	-	±0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Drosg et al., 2015	Reino Unido	2015	R-alim R-bio	6	42.0	7.90	60%	-	-	4.93	0.9	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
					±22.9	±0.36	±0.05	-	-	±2.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bhogal, 2016	Reino Unido	2010	Base comida	21	216.0	8.5	58%	21%	-	4.67	0.61	1.96	0.07	-	0.6	-	9.7	42.5	8.6	136	45.5	7.1	0.5	2.3	1.1	-
		2013			±0.18	±0.06	±1.5%	±3%	-	±0.2	±0.1	±0.08	±0.01	-	±0.1	-	±1.4	±9.0	±3.1	±8.3	±5.0	±0.9	±0.0	±0.0	±0.1	-
Monlau, 2015	Francia	2015	Estiércol odos, cultivos	6	66.00	7.80	70%	-	-	5.41	1.65	4.06	0.95	4.4	2.2	-	-	-	-	1130	149	-	-	-	-	790
	Italia				±69.2	±0.4	±0.1	-	-	±0.3	±0.1	±0.31	±0.1	±3.0	±0.2	-	-	-	-	-	±520	±62	-	-	-	-
Promedio global					133.6	8.06	55%	-	-	4.59	1.37	3.38	0.905	7.59	1.4	8.3	7.7	27.4	4.75	490	80.6	10.95	0.4	1.2	1.1	790
Coeficiente de variación global					69.3%	4.6%	25.7%	-	-	36%	36.6%	25%	65%	63%	81%		37%	55%	115%	113%	73%	50%	23%	131%	-	-

Número de digestores que se analizaron, Lign: Lignina%/SV, MJ: Mega Joules/kg, BH: Muestras frescas o en base húmeda, R-alim: Residuos de alimentos, R-Bio: Residuos biológicos.

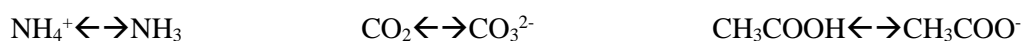
Tabla 2. Niveles máximos permisibles de metales traza en suelo BS por país.

Región	Cd	Pb	Hg	Ni	Zn	Cu	Cr
mg/kg BS							
México (composta)	0.7	45	0.4	25	200	70	70
EU	5	500	5	200	2000	800	600
Austria	3 a 10	100 a 600	1 a 10	100 a 400	<3000	<700	100 a 600
Canadá	3	150	0.6	62	500	100	210
Dinamarca	0.8	120	0.8	30	4000	1000	100
Finlandia	1.5	100	1	100	1500	600	300
Francia	3	180	2	60	600	300	120
Alemania	10	900	8	200	2500	800	900
Irlanda	20	750	16	300	2500	1000	1000
Noruega	2	80	3	50	800	650	100
Suecia	1	100	1	50	800	600	100
Suiza	0.7 a 1	45 a 120	0.4 a 1	25 a 30	200 a 400	70 a 100	70
Holanda	1.25	100	0.75	30	300	75	75
Reino Unido	1.5	200	1	50	400	200	100

Al Seadi y Lukehurst, 2012; NADF-020-AMBT-2011

Por otra parte, resulta muy importante entender que sucede con elementos como NPK con el objeto de estimar su posible uso de suelo, respaldado por lo reportado en la Tabla 1. Durante la digestión anaerobia de la FORSU, NPK sufren cambios químicos principalmente por reacciones de óxido-reducción y metabólicas además de variaciones en el pH.

Por ejemplo, los valores de pH son controlados principalmente por la presencia de los siguientes compuestos dentro del digestor:



El pH tiende a subir cuando se forma carbonato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ o bien cuando el CO_3^{2-} y 2H^+ se transforman en CO_2 y H_2O . Por otra parte, la presencia de iones alcalinos como Ca^+ , K^+ , Na^+ entre otros disminuyen la cantidad de iones de hidrógeno H^+ . Así mismo la presencia de Fe^{+3} y SO_4^{-2} disminuyen la cantidad de H^+ disueltos en el medio. Por otra parte, la precipitación de algunos elementos presentes en el digestor puede promover la disminución en el pH. Como es el caso del CaCO_3 , o la producción de estruvita $(\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ que libera iones H^+ . Usualmente, la tendencia del digestato es hacia un pH alcalino.

Por otra parte, para tener una idea más clara de las características del digestato es importante contar con información relacionada con los procesos microbiológicos que tienen lugar durante el proceso de DA, se sabe que a partir de la primera fase de la digestión anaerobia (hidrólisis), los compuestos orgánicos complejos comienzan a descomponerse, esto en parte por procesos enzimáticos generados por la microbiota presente en el digestor, para así hacer

biodisponibles los nutrientes que se pueden extraer de la FO. Parte de la composición del digestato en cuanto a compuestos con N, P y K puede explicarse al considerar la forma en que los microorganismos anaerobios termófilos más abundantes dentro del digestor aprovechan la materia orgánica. Trabajos de caracterización microbiológica del digestato alimentado con distintos sustratos han demostrado que puede haber una abundancia relativa a la población de bacterias de hasta el 69% de la clase *Clostridia* después de 30 días de digestión (Ramsay y Pullammanappallil, 2001; Gállego, 2017). En lo que respecta al nitrógeno presente en el digestato, gran parte de este se debe a la descomposición de los aminoácidos presentes en la FO. La reacción catabólica de distintos aminoácidos a cargo de *Peptostreptococcus* y *Clostridium*, libera, entre otros compuestos, NH_3 y CO_2 .

En la Tabla 3 se cubren las rutas metabólicas más comunes por los que se biodegrada la materia orgánica en condiciones anaerobias por varias especies de la clase *Clostridia*, generalmente estos procesos son con la finalidad de obtener una fuente de carbón o nitrógeno para el crecimiento de la célula, sin embargo, 5 de los aminoácidos descritos en la tabla sirven como receptores de electrones para producir adenosín trifosfato (ATP); Leucina, fenilalanina, tirosina, triptófano y arginina. Esto muestra que parte del amoníaco presente en el digestato no es nada más por cuestiones metabólicas (catabólicas) sino también por procesos de respiración anaerobia.

Otra parte del nitrógeno orgánico presente en el digestato, es todo aquel que forma parte de la microbiota del digestor, así mismo, nitratos NO_3^- y nitritos NO_2^- , que usualmente están presentes por la oxidación biológica de las amidas en condiciones aerobias, también pueden estar presentes en el digestor en condiciones anaerobias. Estos compuestos suelen ser los primeros en ser usados como receptores de electrones tan pronto se agota el O_2 en el ambiente. Al igual que los aminoácidos mencionados anteriormente, los nitratos y nitritos, se reducen a $\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{NH}_4^+$ (Bohn, 2016). A pesar de esto y aun después de 30 días de digestión anaerobia, se pueden encontrar nitratos en el digestato. Una característica del ion $\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$ es que, a mayor pH y mayor temperatura, aumenta la presencia de NH_3 , y por el contrario, a menor temperatura y menor pH habrá más NH_4^+ . Finalmente, parte del NH_4^+ disuelto en el digestato puede generar un compuesto llamado “estruvita” ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), es un compuesto con forma de cristales que suelen precipitarse. Este último es dependiente de la cantidad de magnesio disponible presente en el digestato por lo que generalmente este compuesto no es abundante. Con lo anterior en mente, se puede suponer que la mayor parte del nitrógeno presente en el digestato dentro de un digestor termófilo (55°C) con pH de 8.2 en promedio, se encuentra en forma de NH_3 disperso entre el espacio de cabeza y/o disuelto en el medio, por tal razón es de esperarse que parte del N del sustrato que alimenta el digestor pueda perderse en forma de gas como impurezas del biogás generado.

Tabla 3. Reacciones bioquímicas del procesamiento de aminoácidos por la clase *Clostridia* que resultan en amoniaco.

Reacción									Red
C ₆ H ₁₃ O ₂ N	(Leu)	+	2H ₂ O	→	C ₅ H ₁₀ O ₂ (3-metilbutirato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	Ox	
C ₆ H ₁₃ O ₂ N	(Leu)	+	H ₂	→	C ₆ H ₁₂ O ₂ (4-metilvalerato)	+	NH ₃ - - -	Red	
C ₆ H ₁₃ O ₂ N	(Ile)	+	2H ₂ O	→	C ₅ H ₁₀ O ₂ (2-metilbutiato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	-	
C ₅ H ₁₁ O ₂ N	(Val)	+	2H ₂ O	→	C ₄ H ₈ O ₂ (2-metilpropionato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	-	
C ₉ H ₁₁ O ₂ N	(Phe)	+	2H ₂ O	→	C ₈ H ₈ O ₂ (fenilacetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	Ox	
C ₉ H ₁₁ O ₂ N	(Phe)	+	H ₂	→	C ₉ H ₁₀ O ₂ (fenilpropionato)	+	NH ₃ - - -	Red	
C ₉ H ₁₁ O ₂ N	(Phe)	+	2H ₂ O	→	C ₆ H ₆ (fenol) + C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + ATP	-	
C ₉ H ₁₁ O ₃ N	(Tyr)	+	2H ₂ O	→	C ₈ H ₈ O ₃ (hidroxifenil acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	Ox	
C ₉ H ₁₁ O ₃ N	(Tyr)	+	H ₂	→	C ₉ H ₁₀ O ₃ (hidrofenil propionato)	+	NH ₃ - - -	Red	
C ₉ H ₁₁ O ₃ N	(Tyr)	+	2H ₂ O	→	C ₆ H ₆ O (cresol) + C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + ATP	Ox	
C ₁₁ H ₁₂ O ₃ N ₂	(Trp)	+	2H ₂ O	→	C ₁₀ H ₉ O ₂ N (indol acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	Ox	
C ₁₁ H ₁₂ O ₃ N ₂	(Trp)	+	H ₂	→	C ₁₁ H ₁₁ O ₂ N (indol propionato)	+	NH ₃ - - -	Red	
C ₁₁ H ₁₂ O ₃ N ₂	(Trp)	+	2H ₂ O	→	C ₈ H ₇ N (indol) + C ₂ H ₄ O ₂ (ácido acético)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + ATP	-	
C ₂ H ₅ O ₂ N	(Gly)	+	H ₂	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ - - -	-	
C ₂ H ₅ O ₂ N	(Gly)	+	1/2 H ₂ O	→	3/4 C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + 1/2 CO ₂ + 1/4 ATP	-	
C ₃ H ₇ O ₂ N	(Ala)	+	2H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2H ₂ + ATP	-	
C ₃ H ₆ O ₂ NS	(Cys)	+	2H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ S + 1/2 H ₂ + ATP	-	
C ₅ H ₁₁ O ₂ NS	(Met)	+	2H ₂ O	→	C ₂ H ₆ O ₂ (propionato) + CO ₂	+	NH ₃ + CH ₄ S + H ₂ + -	-	
C ₃ H ₇ O ₃ N	(Ser)	+	H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + ATP	-	
C ₄ H ₉ O ₃ N	(Thr)	+	H ₂ O	→	C ₃ H ₆ O ₂ (propionato)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + ATP	-	
C ₄ H ₉ O ₃ N	(Thr)	+	H ₂	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato) + 1/2 C ₄ H ₈ O ₂ (butirato)	+	NH ₃ + ATP - -	-	
C ₄ H ₉ O ₄ N	(Asp)	+	2H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + 2CO ₂ + 2H ₂ -	-	
C ₅ H ₉ O ₄ N	(Glu)	+	H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato) + 1/2 C ₄ H ₈ O ₂ (butirato)	+	NH ₃ + CO ₂ + 2ATP	-	
C ₅ H ₉ O ₄ N	(Glu)	+	2H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + 2ATP	-	
C ₆ H ₉ O ₂ N ₃	(His)	+	4H ₂ O	→	CH ₃ ON (formamida) + C ₂ H ₄ O ₂ (acetato) + 1/2 C ₄ H ₈ O ₂ (butirato)	+	2NH ₃ + CO ₂ + 2ATP	-	
C ₆ H ₉ O ₂ N ₃	(His)	+	5H ₂ O	→	CH ₃ ON (formamida) + 2C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	2NH ₃ + CO ₂ + H ₂ + 2ATP	-	
C ₆ H ₁₄ O ₂ N ₄	(Arg)	+	6H ₂ O	→	C ₂ H ₄ O ₂ (acetato)	+	4NH ₃ + 2CO ₂ + 3H ₂ + 2ATP	Ox	
C ₆ H ₁₄ O ₂ N ₄	(Arg)	+	3H ₂ O	→	1/2 C ₂ H ₄ O ₂ (acetato) + 1/2 C ₃ H ₆ O ₂ (propionato) + H ₂ + 1/2 C ₅ H ₁₀ O ₂ (valerato)	+	4NH ₃ + CO ₂ + ATP	Red	

Construido con información de Ramsay y Pullammanappallil, 2001

Aparte del amoníaco, se puede apreciar de la Tabla 3 como, producto del metabolismo de la clase Clostridia, se liberan compuestos que promueven la generación de metano como acetato hidrógeno, CO₂ y energía en forma de ATP.

Para el caso del fósforo presente en la materia orgánica y consecuentemente en el digestato es importante recordar que usualmente se encuentra en cantidades pequeñas respecto a otros macronutrientes, el comportamiento de este elemento dentro del digestor depende en gran medida del pH, la agitación y la cantidad de humedad del digestato. El fósforo orgánico es aquel que es parte estructural de la microbiota y está presente en todo proceso que involucre la fosforilación. También está presente en tejidos adiposos, membranas celulares y ADN. Forma parte de complejos compuestos orgánicos que eventualmente pueden ser mineralizados en el digestor anaerobio. Después de la biodegradación, se sabe que el fósforo se encontrará en su estado más oxidado o más reducido, esto es, en forma inorgánica como ácido H₃PO₄, H₂PO₂⁻, HPO₃²⁻, HPO₄²⁻ o bien como PO₃³⁻ y PO₄³⁻. A mayor pH, mayor es la concentración de PO₄³⁻. Los fosfatos fácilmente forman compuestos con calcio (Ca) y magnesio (Mg) como el fosfato de calcio [Ca₃(PO₄)₂] o el fosfato de magnesio [Mg₃(PO₄)₂]. Estos compuestos dependen de la disponibilidad de Mg o de Ca en la MO y tienden a precipitarse, por lo que es de esperarse que su concentración aumenta en la fracción sólida del digestato.

El potasio usualmente es más abundante que el P en la MO y menos abundante que el N. No es un elemento que se caracterice por formar parte de la estructura celular, por lo que en general se encuentra disuelto en la fracción líquida de la MO y cumple principalmente con funciones electrolíticas. Tan pronto la materia orgánica comienza a hidrolizarse, el potasio es liberado en compuestos como cloruro de potasio (KCl), acetato de potasio (CH₃O₂K), nitrato de potasio (KNO₃) y bicarbonato de potasio (KHCO₃). Una vez mineralizado, el K en el digestato puede unirse a compuestos como el fosfato de magnesio y 6 moléculas de agua formando un compuesto similar a la Estruvita (MgKPO₄ + 6H₂O) el cual tiende a precipitarse y a concentrarse en la fracción sólida del digestato. Este compuesto depende de la presencia de Mg disponible por lo que puede esperarse que la mayor cantidad de K presente en digestato está en mayor proporción disuelto en la fracción líquida de este (Möller y Müller, 2012).

Respecto a lo descrito anteriormente, en la Figura 2 se muestra un esquema que explica a grandes rasgos el probable movimiento de los macro nutrientes N, P y K y algunos micronutrientes como S, Mg, Fe, Cl y Ca, desde el sustrato hasta el digestato suponiendo que este último no ha sido expuesto al oxígeno.

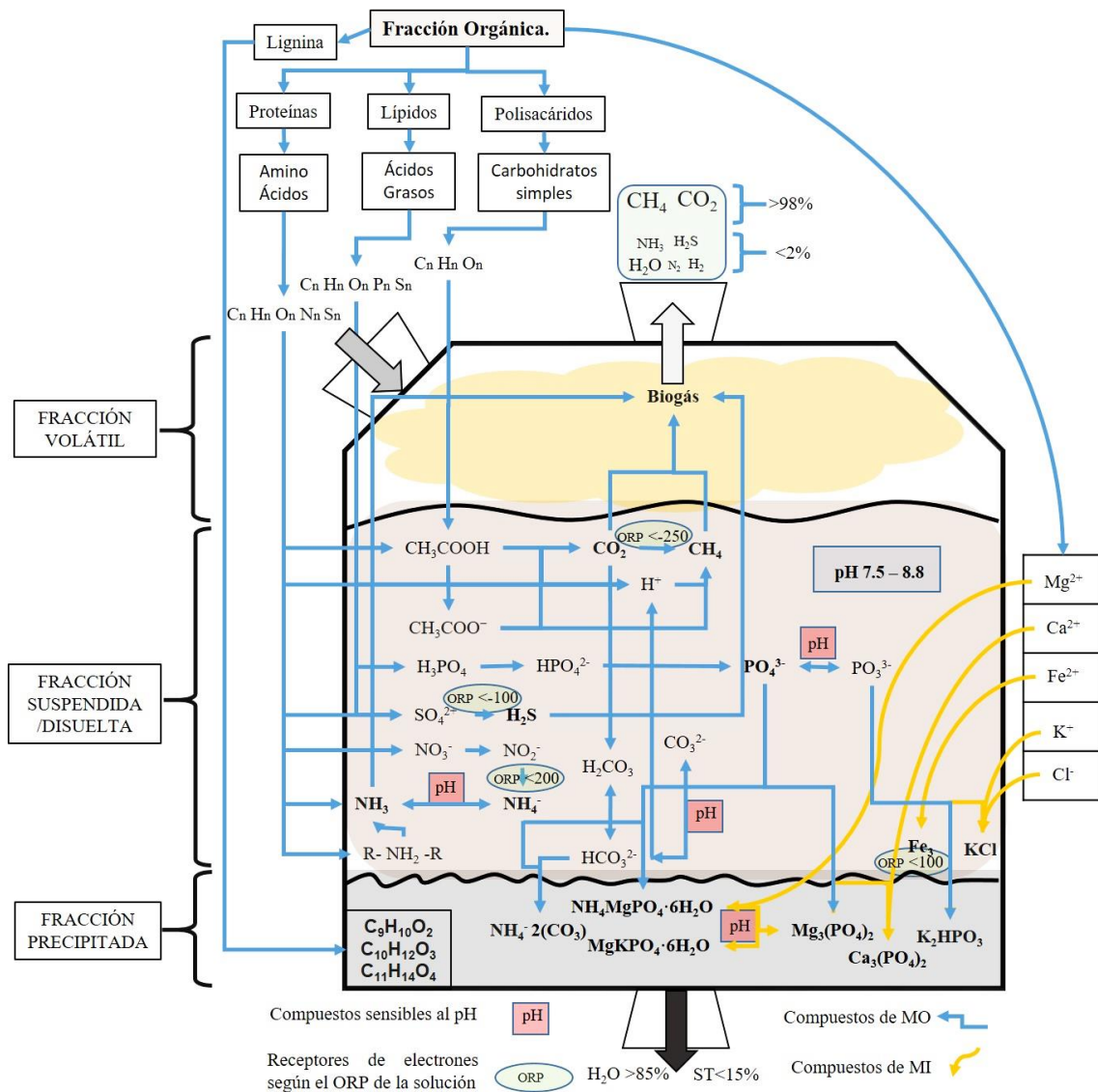


Figura 2. Movimiento de nutrientes en el digestato al término del proceso de la DA (Modificado de Möller y Müller, 2012)

2.3 Fertilizantes en México

La Organización de las Naciones Unidas para los Agricultura y Alimentos (FAO por sus siglas en inglés) publicó en el 2015 un estudio sobre la situación hasta ese momento a nivel mundial y su proyección al 2018 sobre los fertilizantes con los macro nutrientes Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Este estudio analizó precios, demanda y capacidad de producción por sector mundial. En la Figura 3 se muestra una gráfica que compara la demanda de fertilizante con la capacidad propia de producirlo según los países hasta 2014.

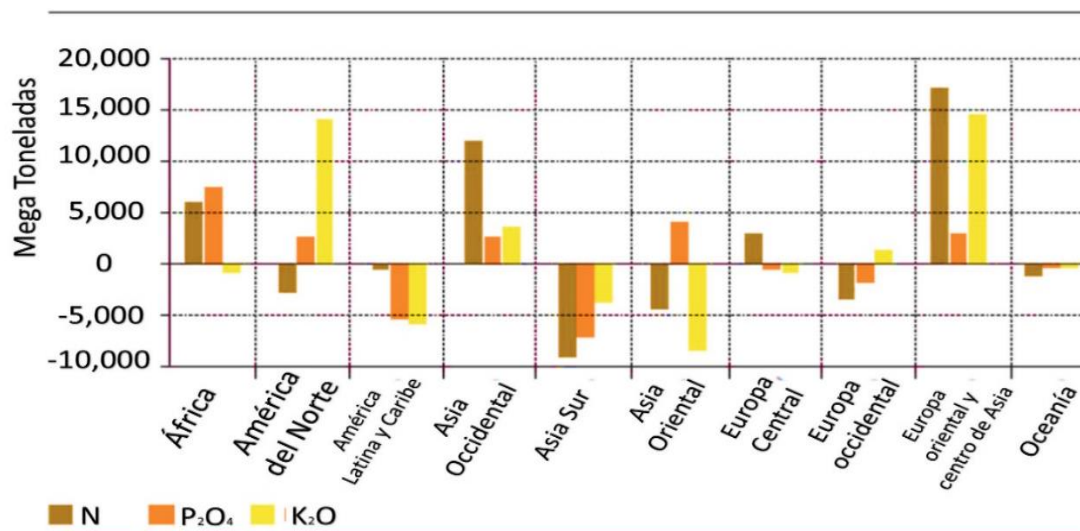


Figura 3. Demanda vs capacidad de producción interna de fertilizantes N, P₂O₄ y K₂O (Crédito de FAO, 2015)

2.3.1. Situación actual de los fertilizantes en México. En América Latina y Caribe se determinó que al menos entre el 2014 y 2018, esta zona tendrá en promedio un déficit de producción de fertilizantes base N, P₂O₅ y K₂O de 525 millones de toneladas, 5,193.4 millones toneladas y 5,393 millones toneladas respectivamente al año. En México, del total de la demanda de fertilizantes base N, P y K (2, 936,978 toneladas al año, hasta el 2014) únicamente se produce el 33.8% localmente, 48.91% es importado y 19.1% es exportado (FAO, 2017).

La baja producción local se puede explicar al analizar la forma en la que se producen los fertilizantes nitrogenados, fosforados y de potasio en México. Todo depende de la disponibilidad de amoníaco, fosforita y sales de potasio que haya en el país más la cantidad que es importada como materia prima.

2.3.1.1. Fertilizantes nitrogenados. En el 2014 la demanda de fertilizantes nitrogenados en México fue de 1,568,361 toneladas. Ese mismo año más del 50% de los fertilizantes nitrogenados fueron importados y la tendencia iba al alza (ANACOFER, 2014). Del 2013 al 2014 la producción de fertilizantes nitrogenados (FN) cayó un 5.1% (de 35.8% a 31.2%) y las importaciones aumentaron 6.2% (de 56.7% a 62.2%), tan solo ese año (FAO, 2017).

De los 9 estados en los que se fabrican FN, el que más producción tiene registrada hasta la segunda quincena del 2017 es Michoacán con el 47.4% seguido por Baja California Sur 10.5% y Colima 8%. El 95.4% de los FN producidos en México usan como materia prima el amoníaco (Secretaría de Economía, 2017). El único productor de amoníaco anhidro en el país es la subsidiaria de Pemex, Pemex Fertilizantes (PF), que cuenta con 4 plantas en Cosoleacaque

Veracruz. Para producir el amoníaco, PF utiliza el gas natural que después es convertido en gas de síntesis. El método que PF utiliza es el Haber-Bosch.

A grandes rasgos, el método usa el hidrógeno del gas de síntesis (H₂) para mezclarlo con el nitrógeno presente en el aire (72% de N₂). Esta mezcla es expuesta a una presión de entre 2,200 y 3,600 psi y a una temperatura entre 400 y 500 °C. Al final del proceso se genera Amoníaco (NH₃), agua y monóxido de carbono (CO). Posteriormente estos productos son separados y purificados (Pemex, 2017). Hasta la fecha, Pemex no ha sido capaz de satisfacer la demanda nacional de amoníaco y la capacidad de hacerlo ha disminuido año con año.

En el 2014 Pemex compró 2 fábricas de fertilizantes; Fertinal y ProAgro, como parte de una estrategia para satisfacer el 70% de la demanda nacional de FN y fertilizantes fosforados (contra el 35% que satisfacía a ese momento) y así disminuir la importación de estos y con ello la volatilidad en precios. Sin embargo, a pesar de la compra de ambas empresas, no se logró la meta de producción, aunado a esto, en el reporte anual del 2016 Pemex informó que en el 2015 se produjeron 575,500 toneladas de amoníaco, 33.8% menos que en el 2014, es decir, la producción disminuyó. Esta situación, según Pemex, se debió a la baja disponibilidad de gas natural y al hecho de no haberse recuperado de la inversión hecha en la compra de las dos empresas de fertilizantes (Pemex, 2016). Con todo esto la producción nacional de fertilizantes nitrogenados disminuyó y en dicho periodo la importación de estos productos aumentó y con ello el precio de los mismos. A la segunda quincena de enero del 2017 el precio promedio en pesos por tonelada (aunque con altas variaciones) de fabricantes de fertilizantes nitrogenados en México se muestra en la Tabla 4

Tabla 4. Precios publicados por fabricantes de FN a la segunda quincena de enero 2017
(Secretaría de Economía, 2017).

Fertilizante	Promedio Precio/ton	DE	No. fabricantes	Valor NPK
Amoníaco anhidro	\$6,620.00	PF	1	82-00-00
Fosfonitrato	\$7,006.25	± \$887.97	4	31-04-00
Nitrato de amonio	\$8,859.44	± \$1,952.48	9	33-00-00
Nitrato de calcio	\$11,620.00	± \$254.56	2	15-00-00
Sulfato de amonio	\$5,270.42	± \$1,391.03	12	21-00-00
Urea	\$7,504.18	± \$873.98	10	46-00-00

*PF: Pemex Fertilizantes es el único productor de amoníaco anhidro.

Con la fallida estrategia de Pemex y la inevitable dependencia que tienen los fabricantes nacionales de FN con la producción de amoníaco de PF, finalmente, los precios aumentaron. De la segunda quincena de enero del 2016 al mismo periodo del 2017 hubo un incremento de 4.7%

en el precio de amoniaco anhidro y 1.4% en promedio general de los otros FN. A la fecha la industria de fabricantes de FN de México depende de la importación de amoniaco anhidro que, según el Observatorio de Economía Compleja (OEC) proviene de Ucrania, Trinidad y Tobago, EUA o Europa Occidental, para así satisfacer parte de la demanda de FN (FAO, 2017). A enero del presente año (2017) el amoniaco de US-Golf NOLA se vendió en \$ 257.00 dls (\$ 5,235.00 pesos aproximadamente) y el amoniaco de Europa occidental en \$ 328.3 dls (\$ 6,687.5 pesos aproximadamente).

2.3.1.2. Fertilizantes fosforados. La producción de fertilizantes fosforados (FF) a nivel nacional depende de la extracción de fosforita que haya en México. Al 2016 se reportaron 2 estados en México que hacen extracción de fosforita; Baja California Sur e Hidalgo, en ese año se registró una producción de 1, 859,000 toneladas y 70,435 toneladas de fosforita respectivamente (hasta el 2014 otra zona de extracción estaba en Tamaulipas), dando un total de 1, 929,435 toneladas de fosforita (Servicio Geológico Mexicano, 2016; Secretaría de Economía, 2017). La fosforita es un compuesto rico en fósforo que se encuentra en depósitos de origen marino-sedimentario y es la materia prima para fabricación de muchos productos aparte de fertilizantes como alimentos, bebidas, cerámicas, detergentes, insecticidas, cosméticos entre otros. La fórmula química de la fosforita es $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$, este compuesto contiene entre un 15 y un 20% de fósforo elemental.

La industria de extracción de fosforita en México actualmente está encabezada por Pemex. A finales del 2015 la empresa con mayor producción de fosforita en México, ROFOMEX, fue comprada por Pemex como parte de su estrategia para cubrir el 70% del mercado nacional de fertilizantes. Contrario al caso del amoniaco anhidro, la falta de producción nacional de FF no es debido a las estrategias de Pemex, pues la empresa sigue manteniendo al alza la producción de fosforita. La falta de producción local de FF en México se debe a la poca cantidad de yacimientos explotables de fosforita en territorio nacional. Debido a lo anterior, para satisfacer la demanda nacional es inevitable importar fosforita o FF (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

Al 2014, del total de la demanda nacional de FF (1,184,685 toneladas), el 42.4% se produjo localmente (2% menos que el año anterior), el 23.7% se importó (11.8% más que en el 2013) y el 33.8% se exportó (4.4% que el año anterior). Estos datos son del total de FF que se comercializan en México (FAO, 2017). Michoacán es el mayor productor de FF con el 30.8% del mercado, seguido por Chiapas con el 23.1% y Morelos con el 23% y finalmente, Querétaro y Nayarit con el 15.4% y 7.7%, respectivamente.

En la Tabla 5 se muestra el precio promedio en pesos por tonelada de distintos FF que se fabrican localmente. Estos precios están actualizados a la segunda quincena de enero del 2017.

Actualmente se sabe de un yacimiento donde se estima que hay más de 300 millones de toneladas de fosforita. Este yacimiento está ubicado en el Golfo de Ulloa en Baja California Sur pero debido al impacto ambiental que se generaría, se negaron los permisos de extracción por parte de la SEMARNAT (BCS, 2016).

Tabla 5. Precio promedio en pesos por tonelada publicados por fabricantes de FF a la segunda quincena de enero 2017 (Secretaría de Economía, 2017).

Fertilizante	Promedio Precio/ton	DE	No. fabricantes	Valor NPK
Fosfato diamónico	\$ 9,647.79	±\$ 1,931.09	6	18-46-00
Superfosfato Simple	\$ 10,050.00	±\$ 2,757.72	5	00-20-00
Superfosfato Triple	\$ 5,700.00	±\$ 2,437.19	2	33-00-00

2.3.1.3. Fertilizantes de potasio. México no es reconocido como un país con extracción y minería de potasio y hasta el 2014 no hay registro de fabricantes de fertilizantes base potasio (FP), por lo cual el 98% del consumo nacional de FP fue importado y el 2% exportado (FAO, 2017). En diciembre del 2009 el director de exploración de la empresa minera Piero Sutti S.A. de C.V., quien trabajó en coordinación con otras empresas mineras como Litio Mex S.A. de C.V., confirmó el hallazgo de un depósito de sales de litio y potasio en sedimentos arcillosos entre Zacatecas y San Luis Potosí (Pacific Coast Minerals, 2010; Coordinación General de Minería, 2014).

El proyecto se mantuvo en plantas piloto y licitaciones de concesiones hasta el 2016 cuando la empresa Alset Energy Co. adquirió el 100% de los intereses que resulten de la explotación de 4 concesiones con un total de 7 salares ricos en litio y potasio (cifras de estudios preliminares estiman que sea 8% de potasio hasta 70 metros de profundidad). Se pretende que a mediados del 2017 empiece la comercialización de sales de potasio a nivel nacional (Alset Energy Corp, 2016). Al 2014, la demanda nacional de fertilizantes de potasio fue de 183,932 toneladas. Actualmente, la fabricación nacional de fertilizantes base potasio depende de la importación de sales de potasio. Guanajuato ocupa la mayor parte del mercado en fabricación y venta de FP, con el 23.1%, seguido por Chiapas, Baja California Sur y Nayarit, con el 15.4% cada uno. En la Tabla 6 se muestra el precio promedio en pesos por tonelada de distintos FP que se fabrican en México. Precios actualizados a la segunda quincena de enero del 2017.

Tabla 6. Precio promedio en pesos por tonelada publicados por fabricantes de FF a la segunda quincena de enero 2017 (SE, 2017).

Fertilizante	Promedio Precio/ton	DE	No. fabricantes	Valor NPK
Cloruro de Potasio	\$ 7,388.63	(±\$ 1,287.16	6	00-00-60
Sulfato de Potasio	\$ 18,980.00	(±\$ 2,210.94)	4	00-00-50
Nitrato de Potasio	\$ 20,533.33	(±\$ 5,661.56)	3	14-00-44

2.3.1.4. Fertilizantes y el impacto ambiental. En cuanto al nitrógeno, si bien el método Haber-Bosch permitió nutrir el campo alrededor del mundo, esto fue a un gran costo, se estima que este método consume alrededor del 4% del gas natural producido a nivel mundial, por otro lado, se han hecho estudios que muestran una alteración al ciclo del nitrógeno que este proceso ha generado a lo largo de más de 100 años de uso, que aunado a esto, se le adjudica una fuerte huella de carbón desde que el proceso se usa comercialmente (Howarth, 2008). Por su parte, para el fósforo y potásico, aun se depende de la apertura de minas para extracción de fosforita y el hallazgo de yacimientos de potasio en México. Se sabe del fuerte impacto ambiental que representa la minería, las nulas prácticas sustentables y el gran consumo energético que esta industria representa.

El esquema de explotación de recursos no renovables únicamente nos dirige a que como país eventualmente dependamos aún más de las importaciones y como consecuencia de esto la demanda hará que suban aún más los precios, afectando así en cadena toda la línea de producción de alimentos en México. Es necesario encontrar alternativas no invasivas, eficientes y renovables para nutrir el campo mexicano.

2.3.2 Usuarios potenciales del digestato en México

Al conocer qué países utilizan el digestato como nutrición vegetal para campos de cultivo, el siguiente paso fue ubicar quien podría ser potencialmente el usuario del digestato en el área conurbana de la CDMX e ilustrar a grandes rasgos la posible logística de manejo del digestato, acopio, entrega y rutas. Los potenciales usuarios del digestato como nutrición vegetal serían poblaciones agropecuarias y zonas con actividad agrícola alrededor o dentro de la CdMx. Para ubicarlos se hizo un reconocimiento de áreas usando herramientas de percepción remota con imágenes captadas por el satélite LandSat 8. Las imágenes son de marzo del 2015 y fueron descargadas de <https://landsat.usgs.gov>.

El reconocimiento se hizo en tres pasos;

1. Ubicación del área con imágenes satelitales a color de la CdMx y 3 km a la redonda, a estas imágenes se les adjuntó un archivo shp para tener delimitación gráfica por delegaciones.
2. Se usó la técnica de sobre posición de bandas de imágenes del satélite Landsat 8 usando el programa ERDAS 9.2 y ArcGis 10.1. Para destacar el suelo con uso para cultivo, se sobresupieron las Bandas 6 – 5 – 2 (Thenkabail et al., 2013).
3. Por último, se usó la técnica de números digitales principales, seleccionando los valores más altos del factor buscado (suelo de cultivo), esto se hace manualmente con calculadora “raster”.

La Figura 4 es el resultado gráfico de lo anterior. En la parte izquierda de la figura, se usó la técnica de sobre posición de bandas 6, 5 y 2 de imágenes Landsat 8, con la cual los espacios (pixeles) con plantas de cultivo se perciben en color verde vivo. Cada pixel representa 30m².

En la parte de la derecha de la se exhibe una imagen en la cual se determinó el valor digital promedio de pixel verde vivo resultado de la técnica de sobre posición ya mencionada, este valor promedio de pixel se sobre saltó en rojo. El resto de la imagen se pasó a escala de grises para que dichos puntos fueran más claros. De igual forma, cada pixel representa 30m².

De ambas imágenes sobresalen 3 zonas las cuales fueron señaladas con círculos amarillos, cada círculo representa un área de 28.5km² aproximadamente. El círculo de arriba a la derecha corresponde a la parte oeste de Texcoco, abajo y al centro corresponde a la parte norte de Xochimilco y el de abajo a la derecha corresponde a la parte noreste de Tláhuac junto con la parte Sur de Valle de Chalco Solidaridad. Aunque existen más áreas con cultivo alrededor de la CdMx, estos tres puntos se tomaron como los principales, ya que, evidentemente cuentan con la mayor densidad de pixeles verdes o rojos según sea el caso (entendidos como áreas suelo para cultivo) y son los que más cercanos están al centro de la CdMx.

Al 2015, en Texcoco, oficialmente se registraron 7,284 hectáreas con uso para diversos cultivos, 2,515.5 en Tláhuac, 1,719 en Xochimilco y 945 en Valle de Chalco Solidaridad. En total, estas 4 áreas suman 12,463.5 hectáreas en las hay 76 cultivos distintos de los cuales se reportó ese mismo año una producción de 19, 022,898 toneladas. La mayor parte de esta producción fue distribuida a la CdMx, Estado de México, Morelos e Hidalgo (SAGARPA, 2015).

Los 76 productos cultivados, hasta el 2015, en dichas áreas fueron:

Aceituna	Chabacano	Haba verde	Remolacha forraje
Acelga	Chícharo	Higo	Repollo
Agapando	Chilacayote	Hongos y Setas	Romerito
Alcachofa	Chile Verde	Hortalizas	Rosa (planta)
Alfalfa Verde	Cilantro	Lechuga	Rye Grass en verde
Alheli (gruesa)	Cineraria (planta)	Lilium (gruesa)	Semilla de frijol
Almacigo (planta)	Ciruela	Maíz en grano	Semilla maíz grano
Amaranto	Coliflor	Maíz forrajero en verde	Sorgo Forrajero
Apio	Crisantemo (planta)	Maíz grano	Tejocote
Aretillo (planta)	Cyclamen (planta)	Manzana	Tomate Rojo
Avena Forrajera fco	Durazno	Margarita	Tomate Verde
Begonia (plata)	Ebo (veza)	Noche buena (planta)	Trigo en grano
Belén (planta)	Elote	Nopalitos	Tulipán Holandés
Betabel	Espinaca	Nuez de Castilla	Verdolaga
Brócoli	Flores (gruesa)	Papa	Zanahoria
Calabacita	Frijol	Pensamiento (planta)	Zempoalxochitl
Calancoe (planta)	Frutales Varios	Pera	
Capulín	Geranio (planta)	Petunia (planta)	
Cebada grano	Girasol Flor (gruesa)	Pon-pon (gruesa)	
Cebolla	Haba Grano	Rabanito	

(SAGARPA, 2015)

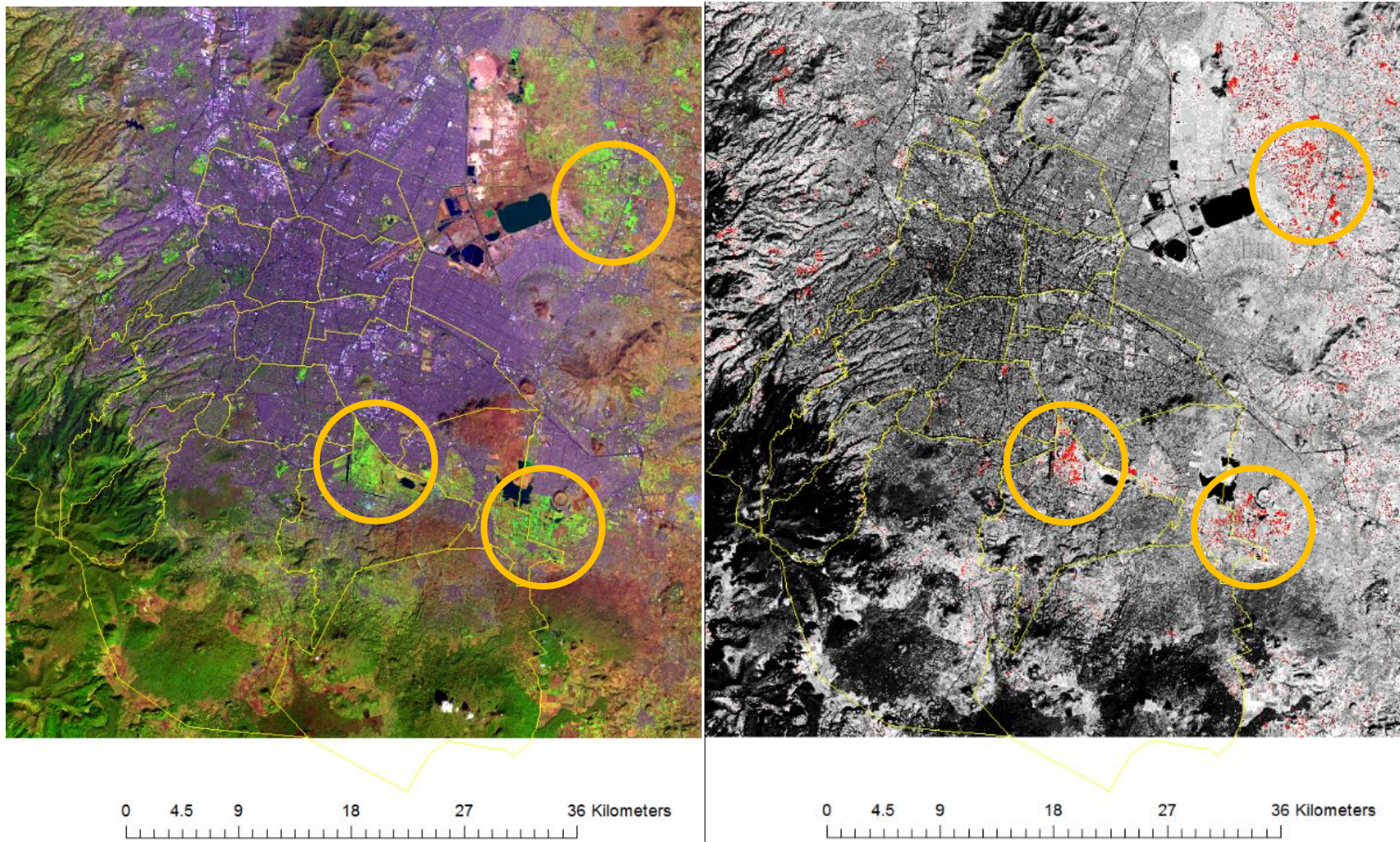


Figura 4 Imágenes satelitales Landsat 8 destacando actividad agrícola. Ciudad de México y área conurbada (Marzo, 2015; Descargada de <https://landsat.usgs.gov>, Enero 2016).

Conocer la variedad de cultivos que hay en estas áreas nos ayuda a entender la demanda que potencialmente existe de nutrición de suelo. En la Tabla 7 se muestra una selección de los 10 cultivos en Texcoco, Xochimilco, Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad respectivamente, en los que se ocupa más terreno (ha), aparte, de cada uno de estos cultivos se muestra la producción registrada en toneladas, valor total de dicha producción en pesos y precio en pesos por kg o pieza al 2015 (SAGARPA, 2015, INEGI, 2017).

Con los datos anteriores, se puede corroborar que las zonas detectadas como terrenos con actividad agrícola usando herramientas de percepción remota efectivamente son espacios que tienen registro ante SAGARPA donde se produce una amplia gama de productos agrícolas y por lo tanto, hay una potencial demanda de nutrición de suelo de más de 12,000 hectáreas alrededor de la CdMx (SRPMA, 2014).

Tabla 7. Principales cultivos que ocupan mayor superficie en hectáreas de Texcoco, Xochimilco, Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad al 2015.

Texcoco				
Producto	Superficie (Ha)	Cantidad (Ton)	Valor total (Pesos)	Valor/kg/pza
Avena Forrajera	3,161.00	61,393.00	\$ 31,608,000.00	\$ 0.51
Maíz en grano	1,733.00	6,389.00	\$ 2,213,149.00	\$ 0.35
Maíz Forrajero	1,230.00	52,759.00	\$ 19,029,729.00	\$ 0.36
Alfalfa Verde	382.00	29,414.00	\$ 15,244,394.00	\$ 0.52
Frijol	189.00	191.00	\$ 2,234,134.00	\$ 11.70
Trigo en grano	137.00	297.00	\$ 916,376.00	\$ 3.09
Rye Grass en vde	70.00	4,239.00	\$ 901,741.00	\$ 0.21
Sorgo Forrajero	49.00	1,230.00	\$ 506,719.00	\$ 0.41
Calabacita	40.00	760.00	\$ 2,479,500.00	\$ 3.26
Haba Grano	30.00	50.00	\$ 815,925.00	\$ 16.32
TOTAL	7,021.00	156,722.00	\$ 75,949,667.00	\$ 36.73

Xochimilco				
Producto	Superficie (Ha)	Cantidad (Ton)	Valor total (Pesos)	Valor/kg/pza
Maíz grano	677.00	836.00	\$ 4,170,566.00	\$ 4.99
Avena Forrajera	227.00	3,405.00	\$ 2,704,115.00	\$ 0.79
Amaranto	83.00	83.00	\$ 1,909,000.00	\$ 23.00
Lechuga	83.00	176.00	\$ 8,592,251.00	\$ 48.82
Ebo (veza)	81.00	891.00	\$ 579,280.00	\$ 0.65
Elote	70.00	322.00	\$ 2,387,401.00	\$ 7.41
Verdolaga	59.00	329.00	\$ 1,701,613.00	\$ 5.17
Espinaca	41.00	318.00	\$ 1,580,029.00	\$ 4.97
Haba verde	39.00	127.00	\$ 1,035,990.00	\$ 8.16
Nopalitos	32.00	2,672.00	\$ 4,802,412.00	\$ 1.80
TOTAL	1,392.00	9,159.00	\$ 29,462,657.00	\$ 105.76

Tabla 7. Principales cultivos que ocupan mayor superficie en hectáreas de Texcoco, Xochimilco, Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad al 2015 (continuación)

Valle de Chalco Solidaridad				
Producto	Superficie (Ha)	Cantidad (Ton)	Valor total (Pesos)	Valor/kg/pza
Lechuga	258.00	4,180.00	\$ 18,249,555.00	\$ 4.37
Brócoli	205.00	2,932.00	\$ 13,016,769.00	\$ 4.44
Romerito	197.00	1,911.00	\$ 7,356,965.00	\$ 3.85
Maíz grano	171.00	576.00	\$ 1,941,655.00	\$ 3.37
Verdolaga	51.00	670.00	\$ 2,010,420.00	\$ 3.00
Acelga	32.00	464.00	\$ 1,566,000.00	\$ 3.38
Espinaca	25.00	353.00	\$ 1,305,159.00	\$ 3.70
Frijol	6.00	8.00	\$ 92,698.00	\$ 11.59
TOTAL	945.00	11,094.00	\$ 45,539,221.00	\$ 37.69

*Únicamente se tiene registro de 8 cultivos distintos al 2015 en esta zona.

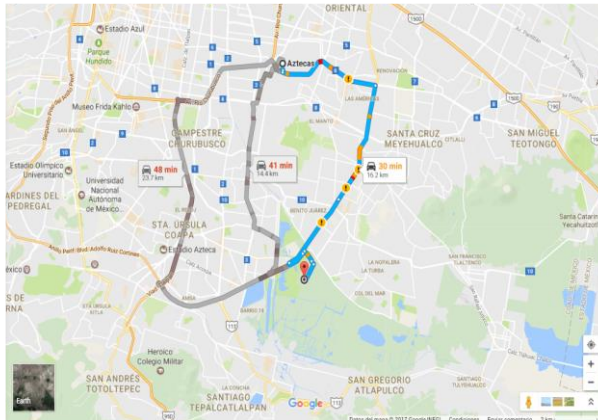
Tláhuac				
Producto	Superficie (Ha)	Cantidad (Ton)	Valor total (Pesos)	Valor/kg/pza
Romerito	586.00	4,278.00	\$ 17,962,511.00	\$ 4.20
Maíz en grano	538.00	6,440.00	\$ 3,393,060.00	\$ 0.53
Brócoli	446.00	325.00	\$ 1,873,075.00	\$ 5.76
Lechuga	234.00	1,488.00	\$ 10,187,196.00	\$ 6.85
Verdolaga	115.00	1,254.00	\$ 6,556,729.00	\$ 5.23
Avena Forrajera	68.00	1,164.00	\$ 924,866.00	\$ 0.79
Maíz forrajero	60.00	1,273.00	\$ 1,228,700.00	\$ 0.97
Apio	53.00	903.00	\$ 4,496,555.00	\$ 4.98
Espinaca	41.00	309.00	\$ 1,465,617.00	\$ 4.74
Acelga	39.00	435.00	\$ 1,692,065.00	\$ 3.89
TOTAL	2,180.00	17,869.00	\$ 49,780,374.00	\$ 37.94

*Avena forrajera y Maíz Forrajero son pesos en fresco.

*Ha: Hectárea, Vde: Verde, Ton: Tonelada.

Tomando en cuenta lo anterior, se hizo un cálculo estimado de distancia y tiempo de recorrido utilizando las imágenes Landsat 8 de la figura 4 y cálculos provistos por Google Maps y Google Earth. Tanto la distancia como el tiempo de viaje se estimaron de acuerdo a la herramienta de programa de Google Maps de “direcciones de viaje”, que considera tráfico y al menos 2 vías alternas para llegar al mismo destino al momento en que se hizo el recorrido de viaje estimado. Los viajes fueron calculados desde el polígono comprendido entre las calles del Eje 6 Sur, Av. Canal Rio Churubusco y la calle Hualquilla. En este trabajo se consideró que, el digestor anaerobio de la CDMX será construido en dicho polígono por lo cual el ejercicio se hizo considerándolo como punto de partida para todos los viajes, no obstante, de no ser ese el caso, este método puede ajustarse fácilmente a otra dirección. El polígono antes descrito es parte la Central de Abasto (CEDA) de la CdMx, desde éste, se hizo la estimación de viaje hasta cada una de las 4 áreas señaladas con mayor actividad agrícola y de regreso (FICEDA, 2016).

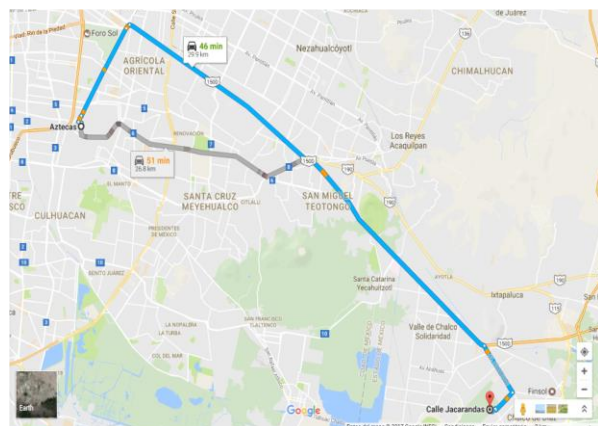
Para la estimación se tomó el promedio calculado de viaje de 5 días en horarios de entre 2 pm y 6pm. En la Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se muestra un ejemplo grafico del cálculo de viaje proporcionado por el programa de Google Maps y a la derecha de cada una se muestra el promedio de distancia y tiempo a cada área (viaje redondo).



CEDA-Norte de Xochimilco

Datos de la ruta	Distancia promedio km	Media en minutos
N=5	34.4	80.5
DE	7.53	5.6
CV	21.9%	7%

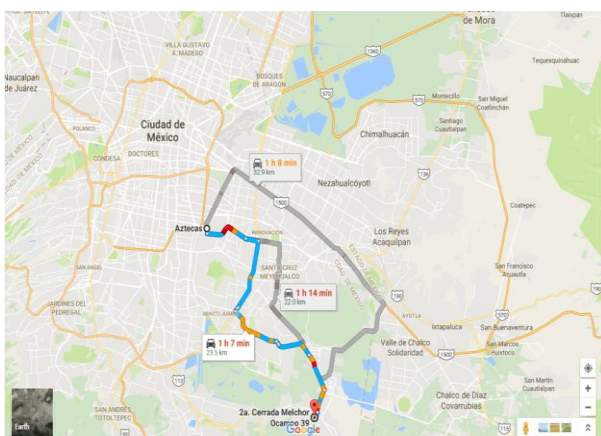
Figura 5. Ruta de viaje CEDA-Norte de Xochimilco (Google, 2017)



CEDA-Sur de Valle de Chalco

Datos de la ruta	Distancia promedio km	Media en minutos
N=5	53.10	95.75
DE	6.81	11.78
CV	12.80%	12.31%

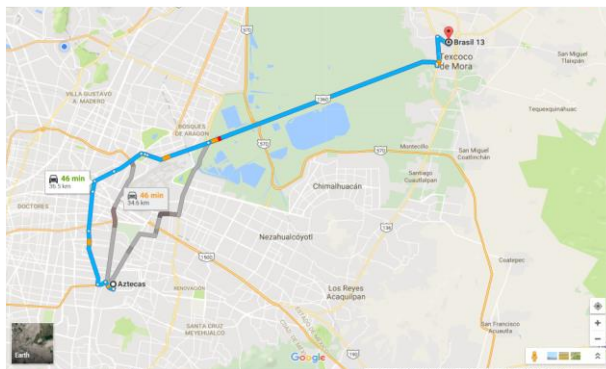
Figura 6. Ruta de viaje CEDA-Sur de Valle de Chalco Solidaridad (Google, 2017).



CEDA-Tláhuac

Datos de la ruta	Distancia promedio km	Media en minutos
N=5	57.20	123.43
DE	6.09	35.01
CV	10.60%	28.40%

Figura 7. Ruta de viaje CEDA-Centro de Tláhuac (Google, 2017).



CEDA-Oeste de Texcoco

Datos de la ruta	Distancia promedio km	Media en minutos
N=5	71.25	112.25
DE	5.78	7.22
CV	8.11%	6.43%

Figura 8. Ruta de viaje CEDA-Oeste de Texcoco (Google, 2017).

Considerando el transporte del digestato en un camión de carga marca FREIGHTLINER Cascadia 2014 con capacidad de 20 toneladas (como los usados en la PCBP) con rendimiento de 2.5 km/l de diésel se hizo un cálculo estimado del costo y consumo en litros por viaje redondo de combustible aunado al cálculo de emisiones de CO₂ en kg de cada viaje. Dicha estimación se muestra en la Tabla 8 (Freightliner Trucks, 2014).

Tabla 8. Estimación de costo por viaje redondo para traslado de digestato a zonas con fuerte actividad agrícola alrededor de la Cdmx.

Lugar de entrega	Consumo de diésel en litros*	Costo por consumo de diésel**	Emisiones de CO ₂ (kg)
Norte de Xochimilco	13.76	\$ 234.61	36.52
Sur de Valle Chalco	21.21	\$ 361.65	56.34
Tláhuac	22.88	\$ 390.10	60.76
Oeste de Texcoco	28.50	\$ 485.92	75.65

*Rendimiento promedio de 2.5 km/l de diésel.

**Precio de litro de diésel a \$17.05/litro.

Precio de diésel consultados en www.Pemex.com al 25/Febrero/2017

Cálculo de Emisiones hechas en <http://cotap.org/home/methodology/>; La combustión de 1 litro de diésel equivale a 10.06 kg de CO₂

Parte importante de la valoración del digestato es el manejo y los costos que esto conlleve, por tal razón los cálculos presentados hasta este punto serán considerados como parte de la conclusión de esta investigación más adelante.

3. METODOLOGÍA

Se diseñó una estrategia experimental que permitiera probar la hipótesis postulada, se fue modificando la primera y adecuando en función de los resultados y en la dirección que favoreciera dicho proceso. Finalmente, el diseño que mejor se ajustó a esta investigación, se ilustra en la Figura 9.

3.1. Diagrama del diseño del estudio.

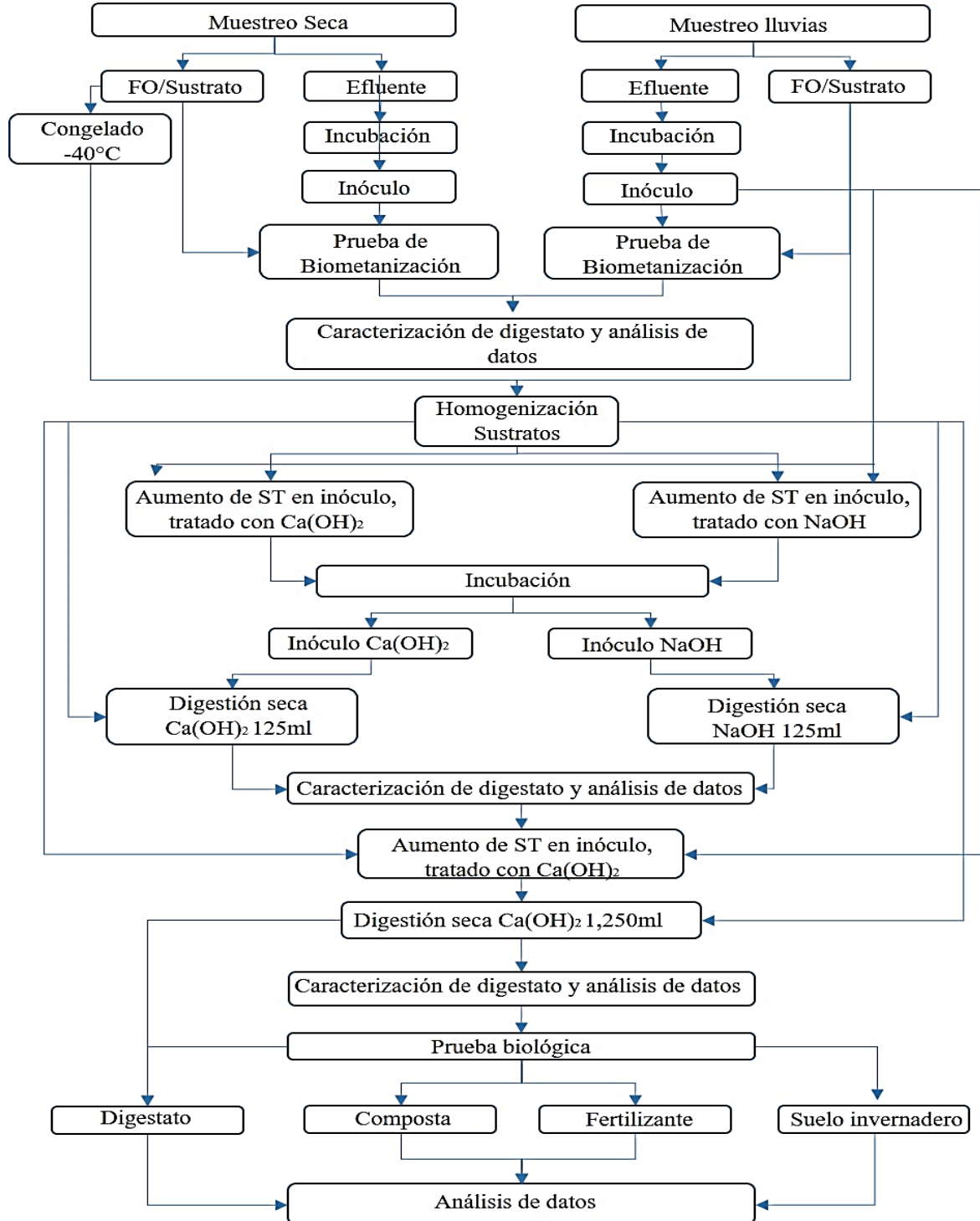


Figura 9. Diagrama de diseño del estudio

3.2 Métodos de muestreo y caracterización de sustrato, inóculo y digestato

En los párrafos siguientes, se describen las técnicas de análisis y métodos de muestreo empleados en el estudio, asimismo en la Tabla 9 se enlistan los métodos de análisis que se utilizaron para evaluar los parámetros físicos, químicos y biológicos del digestato. Los parámetros que se determinaron son: humedad, sólidos totales, materia orgánica y carbono orgánico, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno total Kjeldahl, nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico, niveles de macro y micronutrientes como: P, K, Ca, Mg, Fe y Mn, niveles de macro y micronutrientes y elementos tóxicos tales como: As, Cd, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Se, Si, Sr, Ti, V, Zn.

Para establecer la calidad sanitaria del producto final, se cuantificaron coliformes totales y fecales del digestato por la técnica del número más probable (NMP) y el método de flotación para huevos de helminto y cultivo en placa para salmonela

3.2.1 Muestreo de FORSU e inóculo. Para producir muestras de digestato, a escala laboratorio, que representen el residuo que potencialmente podría generarse por un digestor anaerobio industrial que trate la FORSU de la CDMX, es indispensable tomar muestras representativas de la misma FORSU y hacer digestiones con ella. La cantidad de FORSU que a diario se genera en la CDMX es de aproximadamente 5,000 toneladas, es heterogénea y de baja densidad. Para justificar la representatividad de la muestra, esta se tomó de un espacio en el que se acopia una gran parte de dichos residuos, y una vez ahí, se usaron métodos estandarizados, normados y estadísticos para muestreo.

3.2.1.1 Selección del sitio y fechas para el muestreo del sustrato y efluente como inóculo.

El muestreo del sustrato para la digestión anaerobia (FORSU) se hizo en la PCBP, ya que, en este lugar se descargan alrededor de 2,500 toneladas al día de fracción orgánica separada en fuente proveniente de distintas zonas de transferencia ubicadas en varios puntos de la Ciudad, dichas descargas son acomodadas en pilas distribuidas a lo largo de la planta de composta con la ayuda de tractores de pala. Esta acción ayuda a homogenizar dichos residuos y a su vez permite un mejor muestreo (Barrón, 2013). Se hicieron dos muestreos en el 2016; primero en temporada seca (26 de abril del 2016) y el segundo en temporada de lluvias (29 de agosto del 2016). Esto debido a que la planta de composta trabaja a cielo abierto y se ha demostrado en trabajos anteriores que, en temporada de lluvias, (usualmente es de junio a octubre) las precipitaciones pluviales pueden ser un factor que influya significativamente en la composición fisicoquímica de la materia orgánica ahí presente.

Para tomar la muestra de las pilas frescas de residuos orgánicos en la PCBP se usó un método estadístico para la toma de muestra con una población finita (25 toneladas por camión) contemplando un 10% de error (Yamane, 1965). La muestra se tomó de descargas de camiones hechas el mismo día en que se acudió a la planta. La muestra fue tomada de la descarga de 3

camiones provenientes distintas estaciones de transferencia y de FORSU que ya se encontrara en el sitio que aparentemente fuera de no más de una semana o que personal que labora en la planta indicara que era relativamente fresca. La muestra se pudo tomar de camiones provenientes de las estaciones de Cuauhtémoc, Venustiano Carranza e Iztapalapa.

Aunado al método estadístico, se usó un método para muestreo y caracterización físico-química de suelos y composta (Sadzawka, 2005). Dichos métodos están en armonía con las normas NMX-AA-013, 014, 015, 016, 018, 019, 020, 021, 022, 024- 1985, la norma ambiental local NADF-020-AMBT-2011 y con las especificaciones marcadas en la NOM-021-SEMARNAT-2000 y NOM-004-SEMARNAT-2002.

3.2.1.2 Método estadístico de muestreo

El cálculo estadístico de cuanto debería de medir una muestra significativa para 3 camiones de 25 toneladas en promedio de fracción orgánica, resultó en 99.86kg con 10% de error. El cálculo es el siguiente:

$$n = \frac{N}{1+N(e)^2} \rightarrow n = \frac{75000(kg)}{1+75000(kg)*(0.10)^2} \rightarrow n = 99.86 \text{ kg}$$

3.2.1.3 Método para muestreo de suelo y composta, aplicado en pilas de FORSU. Una vez teniendo la cantidad en kg estadísticamente representativa, se tomaron 33kg aproximadamente de cada una de las 3 pilas a muestrear. Para ello, cada una se dividió en 3 estratos de altura y 3 de longitud. De cada estrato se tomó 1 muestra con pala, es decir, arriba, abajo y en medio a lo largo de 3 puntos. Dando un total de 9 muestras por pila como se muestra en la Figura 10.

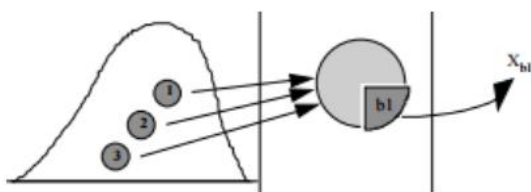


Figura 10. Esquema del muestreo y preparación de cuarteo.

Finalmente, de las 3 pilas se extrajeron en total 27 muestras con un peso total aproximado de 100kg. Estas se juntaron en un solo punto para continuar con el cuarteo (Figura 11).

El método indica que la cantidad juntada debe extenderse para formar un “circulo” e imaginariamente dividirla en 4 partes. 2 partes opuestas se descartan y las otras 2 se mezclan cuidadosamente. El proceso se repite 3 veces.



Figura 11. Toma de muestra por estratificación

Finalmente, queda una muestra de aproximadamente 12kg. Por último, de los 12kg restantes, se hizo de nuevo una división imaginaria en 4. Las 4 se almacenaron en bolsas herméticas ziplock. 2 bolsas se refrigeraron y otras 2 se almacenaron en congelador a -40°C .

3.2.1.4 Método de muestreo para efluente. Trabajos anteriores hechos en el CIEMAD en esta misma línea de investigación, han demostrado que el efluente que escurre de las pilas de composta madura de la PCBP contiene una carga de metanógenos que, al ser alimentada con la FORSU, responde de manera favorable generando biogás. Por lo tanto, con el objetivo de digerir el sustrato con un consorcio microbiano adaptado al mismo, se tomaron muestras de dicho efluente para usarlo como inóculo. Estas se adquirieron de los canales a la base de las pilas de composta madura y del canal que alimenta un cárcamo en el que se almacena el escurrimiento de toda la planta. Ambos canales tienen una profundidad promedio de 50cm, por lo que se procuró tomar las muestras a la mitad de la profundidad usando un muestreador con extensión como aparece en la Figura 12 y Figura 13



Figura 13 Toma de muestra de efluente, canal a la base de la composta madura 26/abril/2016.



Figura 12. Toma de muestra de efluente del canal que alimenta al cárcamo 29/agosto/2016.

3.2.2 Caracterización de sustrato, inóculo y digestato

Fue necesario conocer las características físico-químicas del compuesto orgánico a usar como sustrato, así como las del inóculo, con el objetivo de poder controlar en la medida de lo posible, factores que puedan alterar o modificar variables importantes para el experimento.

Los parámetros a medir fueron: potencial de Hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), potencial de óxido reducción (ORP), Solidos Totales (ST), Solidos Volátiles (SV), Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN), Nitrógeno Amoniacal ($\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$), Fosfato Total (FT), Fosfatos totales (PO_4), Potasio Total (PT), Magnesio total (Mg), Calcio Total (Ca), Metales pesados (Ti, Hg, Pb, Ni, Zn, Cd, Cu y As) y Lignina Klason (LK), en Tabla 9, se muestra una breve descripción del método usado por parámetro.

Tabla 9 Métodos para la evaluación de parámetros fisicoquímicos y biológicos

Parámetro	Método de Prueba	Referencia
pH	Medición potenciométrica en suspensión acuosa 1:5	
Humedad (%)	Gravimetría y secado a $70 \pm 5^\circ\text{C}$	
Conductividad Eléctrica (CE mS/cm)	Medición conductimétrica en extracto acuoso 1:5	
Potencial Oxidación-reducción (ORP, mv)	Medición directa en muestra líquida	
Solidos totales (% BS)	Gravimetría y secado a $70 \pm 5^\circ\text{C}$	Sadzawka et al., 2005
Materia orgánica (%/ST)	Perdida por calcinación a 550°C	TMECC, 2002
N total Kjeldahl (% BS)	Digestión Kjeldahl	
Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) (% BS)	Extracción directa con destilación y volumetría	
C orgánico (g/Kg, BS)	Cálculo a partir de la materia orgánica	
Relación C/N	Relación carbono/nitrógeno	
P total (mg/Kg BS)	Método colorimétrico	
Ácidos húmicos (% BS)	Espectrofotometría Infrarroja	
Ácidos fúlvicos (% BS)		
Lignina (%/SV)	Digestión en H_2SO_4 al 72%, gravimétrico	
Ca (% BS)		
K (% BS)		
Mg (% BS)		
Zn (% BS)		
Cu (% BS)	Emisión óptica de espectrometría	
Fe (ppm)		
Mn (ppm)		
Metales tóxicos traza (As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg % BS)		

Test Methods of US Composting Council (TMECC).

3.2.2.1 pH y CE. Para medir el pH y CE en micro siemens (uS/cm) se usó un equipo marca HANNA HI99300. La CE es la capacidad que una solución para conducir electrones a través de ella. Dicha conductividad suele estar relacionada al contenido de sales, lo cual puede interpretarse en datos de concentración o dureza de la solución. Si bien no podemos saber de qué sales se trata ni la concentración de cada una de ellas, el dato es útil para cada contexto en el que se aplique. Por ejemplo, para la mayoría de las hortalizas cultivadas para consumo humano, un suelo con CE entre 750 y 1990 uS/cm es considerado como apropiado y suele referirse a un suelo con alto contenido de materia orgánica (Tripepi, 2014).

3.2.2.2 ORP. El ORP se cuantificó en mili volts (mv) con un equipo HANNA HI1003. El potencial oxido reducción se utiliza para saber si una solución es oxidante (demandante de electrones) o reductora (con capacidad de ceder electrones). En la microbiología el ORP está relacionado con procesos anaerobios y aerobios. Por un lado los procesos anaerobios suelen reducir distintos compuestos que, en ausencia de oxígeno, son usados como receptores de electrones al final de la cadena de transporte de electrones, sin embargo, cuando no hay suficientes compuestos oxidantes en la solución, esta suele estar en condición de ceder electrones, por lo tanto, es una solución reductora, y por otro lado, los procesos aerobios utilizan el oxígeno como receptor de electrones, por lo cual en condiciones aerobias una solución es oxidante. En base a lo anterior, el ORP permite identificar el momento metabólico en el que probablemente se encuentre una solución. Por ejemplo, se sabe que valores menores a -300 mv en una solución rica en micro organismo representan un proceso de metanización, este valor puede estar relacionado con el pH y la temperatura (Dabkowski, 2008).

3.2.2.3 Sólidos Totales. Los ST se cuantificaron usando una termo-balanza OHAUS MB45. Las muestras fueron mayores a 1g y menores a 5g. Para corroborar los sólidos totales también se midieron con el método que se propone en la NMX-AA-034-SCFI-2015.

3.2.2.4 Sólidos Volátiles. Los SV se midieron usando un método gravimétrico en el que una muestra secada a 70°C por 24hr y a peso constante (sin variación de peso por pérdida de humedad) se calcina a 550°C por 2 horas. La diferencia de pesos entre la muestra antes de calcinación y después de esta, son los SV. Se considera que la materia que se volatilizó es principalmente materia orgánica. Por ende, es un parámetro que se usa para conocer la cantidad de materia orgánica que hay en alguna muestra. Lo anterior conforme la NOM-AA-34-1976.

3.2.2.5 TKN. Para medir el TKN se usaron equipos de la marca Buchi, un equipo para digestión modelo K-345 y otro para extracción por vapor de arrastre modelo K-350. La medición se realizó conforme al método de para la cuantificación del Nitrógeno Total Kjeldahl con equipos marca Buchi. El principio del método es hidrolizar la muestra con ácido sulfúrico a 340°C por 1 a 2 horas (según el tipo de muestra) para mineralizar el nitrógeno de la muestra y mantenerlo en forma de amonio (excepto nitratos y nitritos). Posteriormente la solución acida se alcaliniza

(usualmente con NaOH) y con la ayuda de vapor inyectado se arrastra el nitrógeno en forma de amoniaco para después ser condensado en ácido bórico y titulado con ácido sulfúrico (Huldrych, 2008). Para esta investigación, el TKN se midió con 1g de muestra seca y con 1g en base a solidos totales en el caso de las muestras húmedas. Todas las lecturas se hicieron por triplicado. Para el proceso de digestión se usaron tabletas Missouri para elevar el punto de ebullición del ácido sulfúrico (en razón de 1g de tableta por 2ml de ácido sulfúrico). La digestión se hizo por 2 horas en todas las muestras. La destilación se hizo con inyección de 95ml de solución de NaOH al 32% e inyección de vapor por 4 minutos. El vapor condensado se precipitó en 60ml de solución de ácido bórico al 4% con el pH ajustado a 4.65 y 2 gotas de indicador "SHER". Para titular la muestra se usó una solución de ácido sulfúrico al 0.25M. Para el cálculo en gramos de Nitrógeno en la muestra se usó la siguiente formula:

$$P(N) = \frac{(V_{muestra} - V_{blanco}) * M(N) * C. \text{ácido} * Z}{1000}$$

Los parámetros usados para el cálculo de Nitrógeno Total Kjeldahl son:

P(N)	Peso de Nitrógeno por muestra	[g]
V. muestra	Consumo total de titulante	[ml]
V. blanco	Consumo de titulante del blanco	[ml]
M(N)	Peso atómico del Nitrógeno	14.0067 g/mol
C. ácido	Concentración molar del titulante	[0.25 mol/l]
Z	Valencia del ácido	2 para H ₂ SO ₄

3.2.2.6 Fosfatos Totales. Para medir los fosfatos se usó el método especificado en el kit de HACH para la detección de alto rango (100mg/l) de Fosfatos Totales (PO₄). Para esto se usó un digestor HACH DR200 y un lector HACH DR900. A grandes rasgos, con el equipo DR200 se hace una digestión acida para hidrolizar la muestra a 150°C por 30min. Pasado ese tiempo la solución se neutraliza con NaOH y se le agrega una sal de molibdeno para que reaccione con el fósforo disponible. Finalmente, se agrega vanadio que reacciona con el complejo de molibdeno generando una solución de color amarillo. Mientras más intenso sea el color amarillo, mayor cantidad de fósforo hay. Se hace lectura con el programa 542 del equipo DR900, dicho programa sirve para leer la muestra a 420nm. Para la lectura de fosfatos totales en esta investigación se hizo una dilución de 1:25 de la muestra seca con agua des-ionizada. Esto con la intención de que el equipo detectara lo fosfatos totales dentro del rango del Kit (0 - 100mg/litro). Por lo tanto, para calcular la cantidad final de fosfatos que hay en la muestra, se multiplicó el resultado que el DR900 calculó por la cantidad de dilución, es decir, 25.

3.2.2.7. Fósforo (P%_{bs}), Potasio (K%_{bs}), Calcio (Ca%_{bs}), Magnesio (Mg%_{bs}), Arsénico (As%_{bs}), Cadmio (Cd%_{bs}), Cobre (Cu%_{bs}), Plomo (Pb%_{bs}), Zinc (Zn%_{bs}), Cromo (Cr%_{bs}), Mercurio (Hg%_{bs}), Níquel (Ni%_{bs}) y Titanio (Ti%_{bs}). Para la cuantificación de metales se usó un equipo Optima 4300 DV de Perkin Elmer. En principio, se usa un multi-estándar con cantidades conocidas de dichos elementos como parámetro y después, por medio de espectrometría óptica

de emisión atómica el equipo calcula la cantidad de cada elemento, esto se logra gracias a que la muestra es separada al pasar por plasma de argón a 10,000°C lo cual le permite captar la emisión de los átomos excitados en estas condiciones. La muestra previamente se somete a digestión ácida, para este caso por ser muestras con alto contenido de materia orgánica se usaron muestras de 0.25 y 0.5g, a las cuales se les agregaron 5ml de ácido clorhídrico y 2ml de ácido nítrico y 5ml de peróxido de hidrógeno, en ese orden. La muestra se reposó por 24hr para después calentarla a 60°C por 4hr o hasta que se perciban vapores amarillos y exista una evidente reducción del líquido. Una vez lista la muestra, se filtró en papel Whatman 40. Finalmente, se aforó a 25ml con agua desionizada.

3.2.2.8. Lignina. La lignina se cuantificó usando el método de “Lignina no soluble en ácido” también conocida como “Lignina Klason. La lignina es un polímero que carece de estructura primaria, es decir, su estructura no está definida por lo que siempre tiene distinto acomodo en el espacio. Básicamente está compuesta por la unión de varios polímeros fenólicos. En la naturaleza es abundante como tejido vascular y estructural de las plantas. Muy pocos micro-organismos y solo algunos hongos son capaces de degradarla, por lo cual es considerado un material recalcitrante en términos de biodegradación. Conocer el contenido de lignina es importante para esta investigación por dos motivos: uno es porque al agregar materia orgánica a un digestor anaerobio, la lignina presente en el sustrato será un compuesto recalcitrante así que permanecerá sin mayor cambio durante todo el proceso de digestión. Dada esta condición la medición de lignina se puede usar como indicador de eficiencia en el proceso de digestión, a mayor concentración de lignina en el digestato, más eficiente fue el proceso de biodegradación de la materia orgánica disponible en el sustrato.

El otro motivo es porque la lignina tiene facultades como mejorador de suelo, ya que, es precursor de ácidos húmicos. El uso de compuestos ricos en lignina con tamaño de partícula menor a 1cm o compuestos ricos en ácidos húmicos en suelos de cultivo, permite aumentar la electronegatividad del mismo, aumentando la fijación de nutrientes benéficos para las plantas. Este factor se mide como capacidad de intercambio de cationes expresada en mili-equivalentes/100g (Lu, 2014; Harada e Inoko, 1975). El método de Lignina Klason indica que, al exponer 1g de muestra con contenido de materia orgánica en 15ml de una solución al 72% de ácido sulfúrico por 2 horas, la mayor parte de la materia orgánica presente en la muestra se hidrolizará excepto la lignina. Pasado este tiempo, la solución de ácido se diluye hasta que tenga una concentración de ácido sulfúrico al 3% con agua des-ionizada (aforo a 575ml) y una vez diluida la muestra, esta se calienta hasta llegar a hervir por 4hr (manteniendo el volumen). Pasado ese tiempo, la muestra se filtra y se seca por 24 horas a 70°C. Lo que permanece es, según la técnica, una mezcla de material inorgánico y lignina, por lo cual, para poder diferenciar entre uno y otro, la muestra se calcina en una mufla a 550°C y así, la diferencia que haya entre el peso

inicial antes de calcinación y después de ésta es la lignina que había en la muestra. El método es gravimétrico (TAPPI, 2006).

3.3 Proceso de digestión anaeróbica húmeda y seca y escalamiento.

Las pruebas de DA con los distintos sustratos e inóculos se desarrollaron con la metodología ya estandarizada en el laboratorio del CIIEMAD, que corresponde al modelo empleado en la prueba de metanización que sirve para conocer si algún compuesto (usualmente lodos y excretas) seco, húmedo o líquido contiene microorganismos estrictamente anaerobios o facultativos capaces de generar metano al digerir materia orgánica en un ambiente determinado. A su vez la prueba también permite conocer con qué eficiencia se genera metano (en % del biogás). En caso de que la eficiencia sea suficiente para el experimento, dicho compuesto puede ser usado para inocular digestores anaerobios. Para este trabajo se calculó el poder de metanización usando una modificación del método de Angelidaki et al. (2007);

Preparación de digestores a escala laboratorio de 125ml para la prueba de biometanización:

1. El compuesto a usar como inóculo tiene que pasar por un periodo de 15 días de incubación a la temperatura en que se vaya a desarrollar todo el proceso de digestión (psicrofílico, mesofílico o termófilo), procurando condiciones anóxicas o de poco oxígeno.
2. Para el ensamble de los viales se usó una relación SV 1:1 de inóculo y sustrato. Para lograrlo, son necesarios los valores calculados de ST y SV que contienen tanto el inóculo como el sustrato. En 60ml máximo se tienen que agregar cantidades suficientes de cada elemento para que tanto el inóculo como el sustrato aporten la misma cantidad de SV al digestor (Raposo, 2011). Por ejemplo, si el sustrato fresco tiene 20% de ST y de estos, los SV son el 55%, en 100g de sustrato fresco hay 11g de SV, por otro lado, si el inóculo tiene 10% de ST y 40% de estos son SV, en 100g de inóculo hay 4g de SV. Para lograr una relación 1:1 en base a SV en 60g se hace la siguiente operación:

$$FC = \frac{SV_s}{SV_i} \quad \rightarrow \quad Cm = \frac{Ct}{FC+1} \quad \rightarrow \quad CM = Ct - Cm$$

FC	Factor de cálculo	[cociente]
SV _s	Sólidos Volátiles sustrato	[g]
SV _i	Sólidos Volátiles inóculo	[g]
Cm	Componente menor	[g]
CM	Componente mayor	[g]
Ct	Cantidad total del digestor	[60g]

Donde, el Cm es el componente que tenga más sólidos volátiles por kg y por lo tanto, es del que menor cantidad se requiere, caso contrario, CM es el componente que menos sólidos volátiles tiene y por lo tanto, se requiere de mayor cantidad para lograr la relación 1:1. En este caso, el sustrato es el Cm y el inóculo es el CM. Siguiendo con el ejemplo anterior y usando la fórmula se desglosaría así:

$$FC = \frac{11}{4} \quad \rightarrow \quad Cm = \frac{60(g)}{4+1} \quad \rightarrow \quad CM = 60(g) - 16(g)$$

Esto significa que en un digestor al que se le agregaran 60g entre inóculo y sustrato en relación 1:1 de SV, usaremos 16g de sustrato y 44g de inóculo, de esta forma, ambos contribuyeron con 1.76g de sólidos volátiles.

Se usan los SV por que el método supone que la mayoría de los sólidos volátiles presentes en un inóculo están compuestos por microorganismos (excepto en el caso de inóculos con alto contenido ligno-celulósico como el estiércol) y para alimentar al inóculo, éste se mezcla con la misma cantidad en gramos de SV de sustrato, suponiendo que los SV del sustrato son compuestos orgánicos asimilables para ser digeridos por el consorcio que contenga el inóculo.

Una vez calculadas y agregadas las cantidades de inóculo y de sustrato necesarias (base húmeda) para 60g en relación 1:1 de SV en viales de 125ml, el frasco se sella con septa de goma y anillo de aluminio, como se muestra en la Figura 14.

Ya sellado se extrae manualmente el aire del interior usando una jeringa y posteriormente cada vial se purga con helio de alta pureza por 20 segundos a 25psi.

Para la prueba se usaron 3 tratamientos distintos;

- a. Blanco Negativo (BN-). Los viales con BN fue el inóculo con agua. No hubo relación con sólidos volátiles así que se agregó el mismo gramaje de inóculo contenido en el tratamiento y aforado a 60ml con agua desionizada
- b. Blanco Positivo (BP+). Estos viales usaron el inóculo y celulosa. La relación se mantuvo la relación 1:1 de solidos volátiles. Se agregó un poco de agua para el aforo a 60ml.
- c. Tratamiento inóculo sustrato (I/S). Estos viales se ensamblaron en relación 1:1 de los SV que se encuentran en el inóculo y del sustrato en base húmeda.

De acuerdo al método, cada tratamiento debe hacerse por triplicado, en el caso de este trabajo, se hizo por quintuplicado (Angeladaki et al., 2007).

Los tratamientos ya armados y purgados se incuban a temperatura y agitación constante. En el caso de esta investigación, para incubar las muestras a temperatura y agitación constante se usó un equipo “Shacking Incubator” de LabTech. La temperatura que se usó en esta digestión (y todas las digestiones hechas en esta investigación) fue de 55°C es decir, se trabajó con digestión termófila con agitación constante a 60 rpm. Los viales se incuban por 30 días o hasta que dejen de generar biogás. Durante este periodo, cada 2 días se cuantifica la producción de biogás generado dentro de los viales. Parte de ese biogás es utilizado para analizar sus componentes

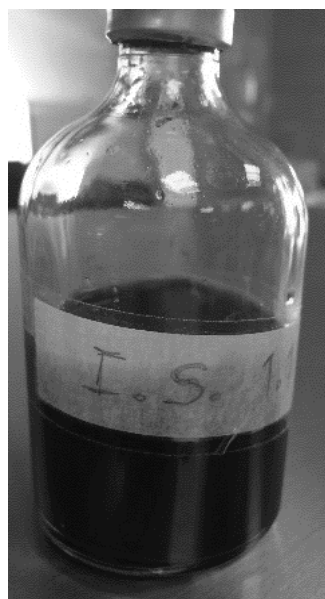


Figura 14. Ejemplo de vial ensamblado con sustrato e inóculo en relación 1:1.

usando cromatografía de gases. Para lo anterior se usó un Cromatógrafo de gases Perkin Elmer Autosystem con columnas para lectura de CO₂, CH₄ y N₂.

El CO₂ como el CH₄ son los principales componentes del biogás, la suma del porcentaje de ambos es de aproximadamente el 98% de la composición. Por otra parte, la cuantificación del N₂ en la muestra de biogás es importante, ya que, sirve como indicador de fugas o entrada de aire en los reactores.

El biogás generado se cuantifica cada 2 días durante 30 días, es decir, se hacen 15 mediciones en total. Cada medición consta de dos extracciones de biogás. En la primera se extraen 2ml con jeringa aforada de vidrio, lo cuales se usan en el cromatógrafo de gases para conocer la composición del biogás. La segunda se hace usando un método de “desplazamiento de émbolo”, en el que se inyectan los viales con una jeringa vacía de 60ml de capacidad y el biogás generado dentro del vial, adquiere suficiente presión como para desplazar el émbolo de la jeringa (Figura 15). La cantidad en ml que el émbolo se desplace es la cantidad de biogás generado.

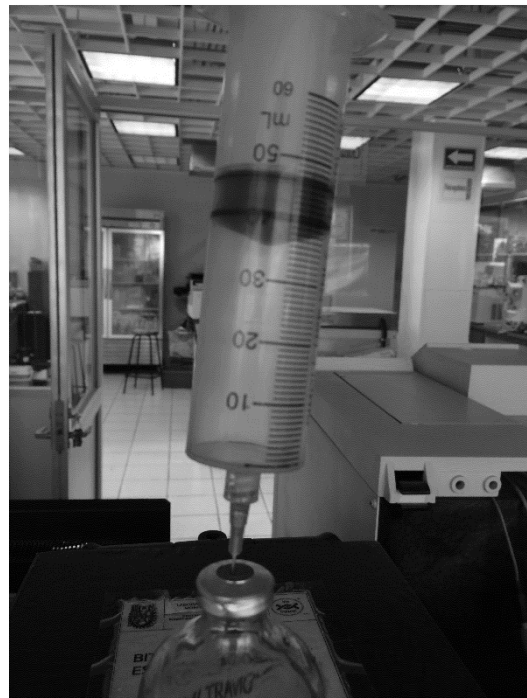


Figura 15. Desplazamiento de émbolo por la presión de la generada la digestión en viales.

Teniendo un porcentaje de composición de metano se valora si el compuesto usado como inóculo es práctico y eficiente para el experimento a desarrollar. El cálculo de eficiencia suele hacerse con relación a los SV, es decir, cuantos ml de biogás se generaron por gramo de SV. En este trabajo la relación biogás-SV se determinó restando la lignina al total de los SV del digestato.

3.3.1 Emulación de condiciones conocidas industriales de digestión anaerobia

3.3.1.1. Digestión Seca Termófila. Con la intención de que este trabajo tenga impacto a nivel industrial y posible aplicación práctica en la CDMX, se buscó la tecnología que potencialmente sería usada para el tratamiento anaerobio de la FORSU. En reuniones en torno al proyecto del digestor anaerobio se mencionó que dos de las empresas licitantes para la construcción del digestor anaerobio de la CDMX son Valorga y Dranco. Ambas empresas son especialistas en la construcción de digestores anaerobios termófilos, de una fases e inoculan con digestato o con efluente del mismo (Kothari et al., 2014).

Por tal situación, se montó una técnica basada en la prueba de metanización para poder hacer digestiones secas, termófilas y de una fase a escala laboratorio, es decir, un digestor

anaerobio que sea inoculado con digestato, que trabaje con ST mayores al 15% al inicio de la digestión, que se mantenga a 55°C y que se le agregue sustrato una sola vez en 30 días en viales de 125ml.

3.3.1.2. Inóculo para la digestión seca. El inóculo que se usó en la prueba de metanización era una sustancia líquida con 95% de humedad en promedio. El hecho de que el 5% del inóculo esté compuesto por sólidos totales y aparte se use un método de inoculación de 1:1 en base a los SV impedía que los digestores tuvieran la humedad necesaria para considerarse “digestores secos”, es decir, una humedad menor al 85%. Fue necesario buscar una opción para disminuir la humedad del inóculo, cuidando las condiciones necesarias para que la micro-biota del inóculo se mantuviera activa.

La FORSU contiene en promedio 25% de sólidos totales, y el inóculo es un consorcio ya adaptado a la FORSU, dado lo anterior, se optó por agregar fracción orgánica al inóculo, suficiente como para que los sólidos totales fueran mínimo del 15% para después promover el desarrollo de los microorganismos en esta nueva mezcla que se usaría de nuevo como inóculo. A esta técnica se le llamó “aclimatación de inóculo” y se desarrolló en el laboratorio del CIEMAD.

Dicha mezcla debería de tener una concentración de sólidos totales necesarios para permitir una digestión seca; mayores al 15%. Se utilizaron 3 mezclas distintas de inóculo y sustrato con la intención de mejorar la cantidad de sólidos totales de la mezcla;

Relación 1.- 15% de inóculo por 85% de sustrato = humedad 78% \pm 6.3%

Relación 2.- 30% de inóculo por 70% de sustrato = humedad 81% \pm 5.2%

Relación 3.- 50% de inóculo por 50% de sustrato = humedad 84% \pm 12.3%

Las 3 relaciones anteriores mantenían una humedad por debajo del 85%. No obstante, el medio se mantenía ácido, por encima de la tolerancia de la microbiota metanógena del inóculo ($\text{pH} < 5.5$), lo cual impediría un buen desempeño en el proceso de aclimatación.

Por lo anterior fue que se optó por ajustar el pH de la FORSU con alguna sustancia que, a su vez, nos permitiera mantener humedad deseada. Este procedimiento se haría solo una vez, ya que, después el inóculo a usar sería el mismo digestato. Para hacer dicho ajuste se usaron 3 soluciones distintas: nejayote, NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

3.3.1.3. Cantidades a usar de solución amortiguadora. Desconocíamos la relación más adecuada para agregar al sustrato, a pesar de que la literatura menciona el NaOH y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no se especifican cantidades y solo se les atribuía función de buffer (Drosg et al., 2015). Para este experimento se usaron 5 concentraciones distintas de cada una de las soluciones ya mencionadas. La cantidad de la solución buffer a agregar al sustrato se calculó en base a la humedad máxima permitida para el inóculo (15%).

3.3.2 Procesos para control de pH.

3.3.2.1. Empleo de nejayote. El nejayote es un residuo común de la industria molinera proveniente de la nixtamalización. Es una mezcla de agua con materia orgánica (proveniente principalmente del maíz) y cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y sal. El nejayote, tiene un pH de alrededor de 12. Es un residuo que actualmente no tiene uso a gran escala y por lo general solo se dispone por el drenaje. Poder darle uso al nejayote daría soporte al esquema de trabajo con la FORSU. El nejayote al contener sólidos totales de $3\% \pm 0.5$ y una concentración muy baja de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultó inadecuado para el ajuste de pH, pues se requería más del 50% w/w de nejayote en la FO para neutralizar el pH, esto aumentó por encima de lo deseado la humedad en la mezcla final, por lo tanto, no se procedió con este tratamiento.

3.3.2.2. Uso de NaOH. La aplicación directa de hidróxido de sodio al sustrato para aumentar su pH era riesgoso y no garantizaba que se homogenizara con la muestra, así que se hicieron soluciones con diferente concentración: 0.1M, 0.5M y 1M.

Para probar cada concentración, se hicieron 9 extracciones de 15 ml de la muestra de FO de la PCBP. Para esto se agregaron 5g de muestra fresca de FO a 20ml de agua desionizada en tubos graduados de plástico con capacidad de 50ml. Después la muestra se agitó en Vortex a velocidad "10" por 30 segundos y finalmente, se centrifugó a 4000rpm para recuperar los 15ml de sobrenadante de cada recipiente.

De las 9 extracciones, a 3 se les agregó 1ml con una concentración de 0.1M de NaOH, 3 con 1ml a 0.5M y 3 con 1ml a 1M. Los valores en cada caso fueron de pH 4.8 ± 0.9 con la solución 0.1M, pH 6.5 ± 0.56 para la solución 0.5M y pH 8 ± 1.2 para la solución 1M.

La solución 1M aumentaba demasiado el pH por lo que se decidió seguir con la solución de 0.5M. El pH de 6.5 fue un valor dentro del rango aceptable para el buen desempeño del proceso de la digestión anaerobia y dicha cantidad no aumentaba mucho la humedad de sustrato. El resultado fue 6% w/w de solución 0.5M de NaOH sobre el peso de la muestra.

3.3.2.3. Uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Un método similar al anterior se usó para el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con la diferencia de que este no tenía que disolverse en solución acuosa. La presentación en polvo del hidróxido de calcio permitió que fuera fácil de mezclar en el sustrato. Se hicieron concentraciones de prueba con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mezclándolo con el sustrato en razón de gramos de hidróxido de calcio por Kg de muestra; 2g/Kg, 3, 4, 6, y 8g/kg. Al hacer la mezcla con 6g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /kg de sustrato, se logró un valor de pH de 6.8 ± 0.2 , valor que está dentro del rango aceptable para el desarrollo de la digestión anaerobia.

Una vez teniendo los datos anteriores, se preparó un inóculo con ajuste de pH usando 6% de NaOH 0.5M w/w de sustrato y otro inóculo con ajuste de pH usando 6g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /kg de sustrato. Para una primera prueba se hizo la mezcla en recipientes de plástico con tapa y la

proporción que se uso fue de 30% inóculo líquido incubado por 15 días y 70% de sustrato con ajuste de pH. Posteriormente se hizo una prueba en viales purgados y herméticos en los que se usarían las proporciones que necesarias para mantener una humedad menor al 85%, es decir, 30% de inóculo líquido incubado por 15 días y 70% de fracción orgánica fresca (FOF) con ajuste de pH.

Las cantidades y valores de pH de la mezcla final a 650g 70/30 es la siguiente:

a. Inóculo $\text{Ca}(\text{OH})_2$

497g de FOF + 3g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + 150g de inóculo líquido incubado.

pH inicial de la mezcla $\rightarrow 7.5 \pm 0.2$

b. Inóculo NaOH

470g de FOF + 30ml de NaOH 0.5M + 150g de inóculo líquido incubado

pH inicial de la mezcla $\rightarrow 6.9 \pm 0.09$

Ambas mezclas se hicieron lo más rápido posible para exponerlas el menor tiempo posible a oxígeno. Las mezclas se guardaron en frascos de plástico de litro, los cuales a su vez se mantuvieron dentro de bolsas herméticas marca ziplock especiales para congelados, a las que se les extrajo el aire con una bomba de succión a 30psi. Las muestras fueron almacenadas en una incubadora sin luz y sin agitación a 55°C como se muestra en la Figura 16.

El siguiente paso fue incubar los inóculos y darles seguimiento periódicamente midiendo indicadores clave para un inóculo con potencial metanógeno; pH y ORP. El pH nos indica viabilidad del medio para albergar metanógenos, así como la fase en la que se encuentre el proceso de digestión anaerobia. En especial el ORP se tomó en cuenta para el seguimiento, ya que, como se mencionó anteriormente, el ORP es un claro indicador de procesos aerobios o anaerobios.

Al día 15 de incubación, los recipientes se abrieron para tomar lectura de pH y ORP, después se tomaron muestras los días 20, 25 y 35 de la fecha de incubación. Los valores fisicoquímicos iniciales se muestran a detalle en la Tabla 10 y los valores del seguimiento en la Tabla 11.



Figura 16. Recipientes de plástico con y sin bolsa ziplock en incubadora.

Tabla 10. Valores de la mezcla para preparación de inóculo con ajuste de pH al día 0.

Parámetros	F.O. con Ca(OH) ₂ *	F.O. con NaOH*
Inóculo líquido incubado (g)	150	150
Buffer	3g de Ca(OH) ₂	30mlNaOH 0.5M
Fracción Orgánica (g)	500	500
HT%	75.24	81.40
ST%	24.76	18.60
SV%	17.68	12.91
pH	7.8	6.35
ORP (mv)	25	28

*Preparación de inóculo para digestión seca 30% inóculo 70% F.O.

Tabla 11. Seguimiento de pH y ORP del inóculos aclimatados durante los días 15, 20, 25 y 36

Parámetro	Periodo	Inóculo Ca(OH) ₂ *	Inóculo NaOH*
pH	Día 15	7.4 ± 0.1	5.53 ± 0.2
ORP		-385 ± 13.2	-125 ± 9.5
pH	Día 20	7.8 ± 0.07	7.02 ± 0.05
ORP		-420 ± 12.4	-350 ± 11.5
pH	Día 25	8.25 ± 0.3	8.2 ± 0.06
ORP		-430 ± 10.4	-405 ± 9.02
pH	Día 36	8.25 ± 0.03	8.01 ± 0.07
ORP		-430 ± 14.2	-420 ± 10.2

*Valores obtenidos por lecturas por triplicado, usando equipo HANNA para pH y ORP.

Como se muestra en la tabla anterior, tanto el inóculo de Ca(OH)₂ como el de NaOH obtuvieron lecturas favorables para poder ser usados como inóculo, por tal motivo se montaron 2 pruebas de viales de 125ml, una por tratamiento. Por otro lado, parte de emular las condiciones industriales, era inocular con digestato. Dado el hecho que la incubación del inóculo preparado fue por 36 días a 55°C se puede considerar que es propiamente el digestato de un proceso de digestión anaerobia, por lo tanto, se puede decir que se inoculó con digestato de la digestión de fracción orgánica a la cual se le neutralizó el pH.

3.3.3 Aclimatación anóxica. El uso de recipientes de plástico con tapa resultó conveniente para el proceso de aclimatación, ya que, permitió darle seguimiento mediante la medición del pH y ORP. No obstante, la aclimatación óptima de inóculo debe ser en un ambiente anóxico, mismo que no se mantuvo por todas las ocasiones que el recipiente se abrió. Esto aunado al hecho de que los recipientes no se purgaron con helio o algún otro gas inerte para desplazar el oxígeno que pudiera haber. Por tal motivo, el siguiente paso para aumentar los sólidos totales del inóculo, fue preparar un inóculo aclimatado en condiciones anóxicas con distintas concentraciones de sustrato. En el proceso anterior, notamos valores de ORP y pH más convenientes (aunque sin diferencia

significativa) para este trabajo usando el sustrato amortiguado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Por lo tanto, para la aclimatación en ambiente anóxico únicamente se trabajó con el sustrato tratado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Se ensamblaron 4 viales con un total de 60g; 2 con 20g (33%) de inóculo líquido incubado por más de 15 días (ILI15) y 40g (66%) de FO con ajuste de pH y otros 2 viales usando 30g (50%) de ILI15 y 30g (50%) de FO con ajuste de pH. Los viales se sellaron y purgaron con helio ultra puro y se incubaron por 44 días. En este caso, el seguimiento no se hizo midiendo pH o ORP, en cambio, se dio seguimiento midiendo la producción y composición de biogás. El criterio de comparación para considerar que el proceso se estaba desarrollando de forma correcta y cual de ambos casos (Mezcla33% o Mezcla50%) era más efectivo, fue en la cantidad de biogás generado (usando el método de desplazamiento de embolo). Los promedios de los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Seguimiento de producción de biogás en viales con 30% y 50% de inóculo.

Tratamiento	Producción de biogás por día en ml valores promedio y DS															Total (ml)	
	Número de día																
	2	6	8	10	13	20	22	24	28	30	31	34	36	38	41		44
*M30% _{ml}	70	72	10	15	15	10	5	22	5	5	5	30	30	21	11	30	<u>341</u>
	±7	±6	±1	±1	±1	±1	±0	±1	±0.1	±0	±0	±2	±1.8	±1.5	±0.7	±1.1	±26
**M50% _{ml}	70	42	55	45	20	35	35	60	100	45	21	34	36	38	41	44	<u>721</u>
	±6	±6	±7	±5	±2	±2	±2	±7	±18	±4.4	±1.9	±1.9	±2.2	±2.7	±5.5	±5.2	±78.8

*M30%_{ml}: Cantidad de biogás generada en mililitros en viales con mezcla de 30% inóculo con 70% de F.O. con ajuste de pH.

**M50%_{ml}: Cantidad de biogás generada en mililitros en viales con mezcla de 50% inóculo con 50% de F.O. con ajuste de pH.

Usando el sustrato con pH cercano a un valor neutro, se esperaba que la diferencia entre ambas mezclas seria que la del tratamiento 33% tardaría un poco más que la de tratamiento 50% en estabilizarse y tener propiedades similares de inóculo, por tal motivo este experimento se alargó de 30 a 45 días. Los resultados no fueron como se esperaban pues al concluir el periodo para la preparación de inóculo en condiciones anaerobias fue evidente que la mezcla en la que se usó 50% de inóculo genero más del doble de biogás (721ml) comparado con la mezcla que uso el 30% del inóculo (341ml). La diferencia en producción de biogás es evidencia de actividad y abundancia de los microorganismos. Aunado a lo anterior, se tomaron en cuenta los valores iniciales y finales de humedad, pH y ORP. Estos valores se midieron al día 0 de la incubación y al día 45. Los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Variable de proceso del día 0 y 45 de incubación.

Muestra I%/S%	Día	Humedad %	ORP mv	pH
M50% _{ml}	0	84.73	-150	7.5
	45	87.56	-410	8.4
M30% _{ml}	0	82.87	-65	7.03
	45	84.59	-161	5.54

De la Tabla 13, a pesar de ser el promedio de 2 unidades experimentales, se puede apreciar que las condiciones iniciales son similares, sin embargo, al término del experimento los valores de ORP y pH difieren notablemente entre ambos casos.

El hecho de que el pH del inoculado al 33% fuera de 5.54 al día 45 significa que la producción de AGV fue mayor a la que los metanógenos pueden consumir finamente inhibiendo el proceso de metanización, así mismo el ORP corrobora lo anterior pues el valor mínimo de una solución en etapa de metanogénesis es de -350 mv como ya se mencionó anteriormente.

El inóculo aclimatado que se preparó en recipientes de plástico con una relación de 30% obtuvo resultados favorables, pero cuando se hizo en ambiente anaerobio con la misma relación no fue el caso. Una posible explicación de este resultado es que al igual que en los viales sellados, los AGV generados en los recipientes de plástico pudieron ser suficientes para acidificar el medio al grado de inhibir la metanogénización, pero, a diferencia de los viales cerrados, los botes de plástico se abrieron 7 veces para tomar lectura de pH y ORP en forma de seguimiento en distintos días. Cada que el recipiente se abría es probable que los AGV que se habían acumulado en el espacio de cabeza del recipiente se volatilizaban en el aire. De esta forma, el exceso de AGV se liberaba y así el equilibrio Acidogénesis - Acetogénesis – Metanogénesis probablemente se mantuvo en los recipientes de plástico.

Ya que, se había logrado estabilizar un inóculo en los botes de plástico que había usado una relación 33%-66% y contábamos con mayor cantidad (650g) que lo generado en los viales (110g), optamos por usarlo como inóculo de las siguientes pruebas de digestión seca y un inóculo se prepararía posteriormente usando la relación de 50% ILI15 por 50% de FO w/w para evitar pérdidas de tiempo e incertidumbre en cuanto a la estabilización del inóculo.

3.3.4 Digestión seca en viales de 125ml con inóculo aclimatado

En este experimento la relación I/S se hizo 2:1 pero en peso, es decir, 40g de inóculo y 20g de sustrato. La relación ahora fue en razón de pH. La cantidad de inóculo aclimatado con pH 8.00 - 8.25 necesaria para amortiguar el pH de 4.5 de la FO fue la que dictó la relación.

Con dos partes de inóculo por otra de sustrato fue suficiente para obtener un pH alrededor de 7.3. Los sólidos totales del inóculo aumentaron considerablemente (un 15% aproximadamente) al momento de hacer la mezcla sustrato/inóculo en los digestores, la humedad quedó por debajo del 85% siendo así digestión seca.

Al igual que en la prueba de metanización, se trabajó con 3 tratamientos distintos; BP+, BN- y un tratamiento experimental. En esta ocasión se hizo todo por triplicado. Así mismo se hizo seguimiento del proceso extrayendo el biogás generado, midiendo la cantidad con la técnica de desplazamiento de émbolo y composición del mismo usando un cromatógrafo de gases Perkin Elmer Autosystem. Se hicieron extracciones cada 2 días. Los viales se incubaron por 30 días a

55°C con agitación constante a 60 rpm, aunque la agitación no promovía lo suficiente la homogenización dada la baja humedad de la mezcla I/S.

3.3.5 Escalamiento de digestión anaerobia seca 10 veces.

Con el objetivo de conocer la representatividad del digestato generado de la digestión seca de la FORSU a escala laboratorio en recipientes de 125ml frente al digestato que pudiera generar un digestor más grande, construí 3 digestores con los que se escaló 10 veces el experimento, usando únicamente el tratamiento de inóculo con sustrato. Los resultados de ambos tratamientos se compararon estadísticamente para conocer posibles diferencias significativas que pudiera haber.



Figura 17. Recipientes de litro ensamblados dentro de incubadora a 55°C.

Basándonos en el método montado de digestores a escala laboratorio con digestión seca y termófila de una fase que se montó con viales de 125ml, se ajustó el proceso para ensamblar contenedores de vidrio de 1,250ml como se muestran en la Figura 17.

3.3.5.1. Adaptación de los frascos

El objetivo en este paso fue idear la forma más económica y útil al experimento de un contenedor que soportara un mínimo de 80 psig y que fuera hermético, que soportara largos periodos de exposición a una temperatura de 55°C y que permitiera hacer extracciones de biogás para darle seguimiento a la digestión.

Se trabajó en varios diseños para hacer digestores en frasco de litro, finalmente, el recipiente que permitió hacer una adaptación para tomar muestra de biogás para lectura de gases en cromatógrafo y al mismo tiempo permitió hacer purga del mismo gas para la cuantificación de producción en volumen del mismo gas, a dichas condiciones de presión y temperatura, fue con frascos de cultivo.

Los frascos usados conocidos como frascos de cultivo, usan tapas llamadas “GL 45” con rosca. Para poder extraer gas y hacer la lectura de composición en el cromatógrafo y para cuantificación del biogás producido en dichos frascos se trabajó específicamente con la tapa GL45. En la Figura 18 se muestran los principales componentes de la adaptación;

- A. Tapón “hembra” de PVC con orificio taladrado al centro, que permite sujetar la septa y apretarla al grado de sellar.

B. Conector macho de PVC en el que embona la septa de goma común que se usa en los frascos de 125ml. En esta rosca se aprieta y ajusta la septa para permitir la extracción de gas.

C. Manómetro relleno de glicerina con conector de ¼ de pulgada en bronce, lectura de presión de 0 a 100psig. Permite medir la

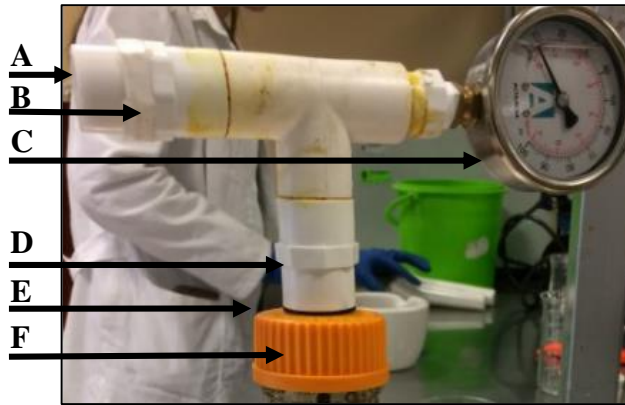


Figura 18. Componentes más importantes del reactor en frascos de cultivo.

presión que se genera por la producción de biogás. Es importante para el cálculo del volumen del biogás generado, por otro lado, advierte si la presión es muy alta o si existe alguna urgencia de purgar. Se adaptó una septa para poder extraer el biogás generado y poder medir su composición en el cromatógrafo de gases. A diferencia de los viales de 125ml, la forma en la que se midió la cantidad de biogás fue usando la técnica de desplazamiento de agua para medir volumen de gas a temperatura ambiente.

D. Conector “hembra” que permite hacer presión con un conector macho por dentro de la tapa y a su vez conectar el resto del equipo.

E. O-ring de neopreno que evita las fugas de biogás.

F. Tapa GL 45 ahuecada ¾ de pulgada para que pase un conector macho de ½ pulgada de PVC que permite sujetar todo el mecanismo y sellar contra fugas.

Desde el proceso de preparación del inóculo [ajuste con $\text{Ca}(\text{OH})_2$] hasta la proporción de I/S usado en los viales de 125ml se reprodujo en los frascos de 1,250ml.-

3.3.5.2. Inoculación

El inóculo se aclimató (incrementó ST) de nuevo neutralizando el pH de la FO con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para después incubarlo por 30 días para aumentar la cantidad de sólidos totales del inóculo al igual que se hizo con los viales de 125ml solo que 10 veces la cantidad, es decir, 600g de inóculo líquido por 600g de sustrato y 6g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por kg de sustrato. Cabe aclarar que en esta ocasión, desde un inicio el inóculo se aclimató usando una relación de 50% ILI15 y 50% de FO con ajuste de pH.

Se ensamblaron los digestores en los recipientes ya mencionados, agregando el inóculo necesario en función al pH final de la mezcla, la cual debía pesar 600g en total. Finalmente, se requirió de 300g de inóculo aclimatado para amortiguar el pH de 300g de sustrato, dejando así más de 600ml de espacio de cabeza, para este experimento.

Una vez ensamblados los frascos, se les extrajo el aire con bomba de succión, después se purgaron con helio ultra puro durante 1 minuto y se incubaron a 55°C. Para este experimento, se prepararon únicamente 3 frascos con tratamiento y no se usó BN- ni BP+.

3.3.5.3. Medición de biogás.

Para la medición de biogás se cambió el método de “desplazamiento de embolo” porque dejó de ser práctico para los recipientes de 1,250ml (se requerían 17 tomas por día con jeringa de 60ml). El método que mejor se ajustó al experimento fue el “desplazamiento de agua”. Esto se muestra en la Figura 19 y se conforma por lo siguiente:

A.- Contenedor aforado a 1 litro. Éste se llena de agua y se pone boca abajo en otro recipiente con agua (C).

B.- Septa del digestor de donde se toma la muestra para inyección y para purga.

C.-Reservorio de agua para permitir vacío del recipiente A.

D.- Jeringa conectada a tubo elástico de 60cm.

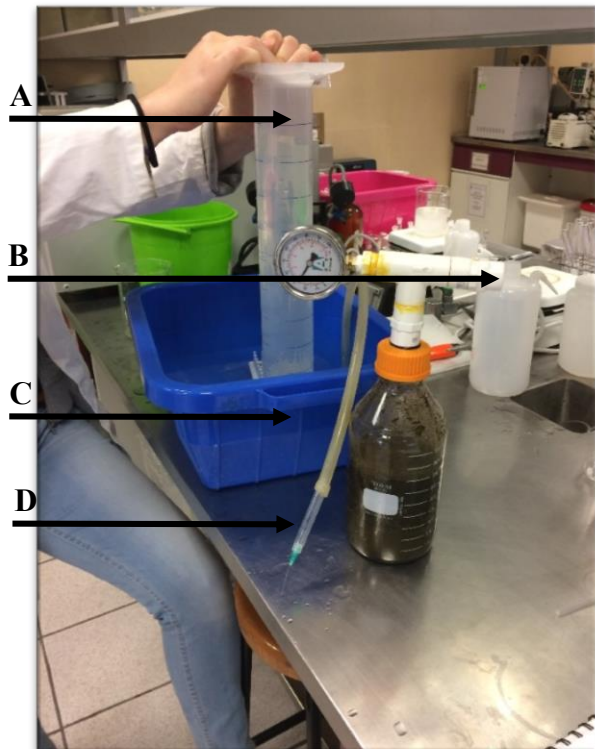


Figura 19. Medición de biogás por método de desplazamiento de agua.

En principio, el método depende del vacío que hacen dos recipientes (A y C) llenos de agua. El recipiente A lleno de agua y boca abajo dentro del recipiente C, desplazará el agua que contiene tan pronto entre aire. El volumen de aire que se ingrese al recipiente, es el volumen que se desplazara de agua. Para esto, se usa la parte opuesta de la jeringa (D), la cual debe ubicarse dentro del recipiente A, y por otro lado, la jeringa (D) se inyecta en la septa (B) del frasco. La producción de biogás dentro de los digestores se canalizó a través del tubo elástico hasta el recipiente A. El volumen generado de biogás será la cantidad de agua desplazada del recipiente aforado A.

Este método es útil para el cálculo de volumen generado de biogás dado que la presión que tiene el gas que se pasó al recipiente (A) es la misma que la atmosférica local y la temperatura es la que tenga el agua de la línea. Es decir, presión y temperatura local. Puede haber pérdida de CO₂ cuando el biogás pasa por el agua en forma de ácido carbónico. Para evitar lo anterior, se satura el agua con NaCl y se baja el pH a 2.

3.3.5.4. Tratamiento del digestato después de abiertos los frascos.

El digestato que se generó en los 3 frascos anteriores se acidificó con ácido sulfúrico hasta lograr un pH de 6 aproximadamente para evitar la pérdida de Nitrógeno en forma de amoníaco, ya que, el 80% del nitrógeno contenido en el digestato está en forma de amonio (Pantelopoulos, et al. 2016). En total se recuperaron 1.7 kg de digestato, de los cuales, 300g se almacenaron en

refrigeración para caracterización. El resto se deshidrató a 70°C por 48hr para la prueba biológica con plantas.

3.3.6 Prueba de coliformes fecales (Cf), salmonella (Snl), huevos de helminto (HH) y metales traza (Mt).

Actualmente no existen regulaciones en torno al uso y características del digestato, por lo tanto, no hay rangos ni propiedades normadas para su aprovechamiento. La NADF-020-AMBT-2011 no especifica que el digestato sea un lodo, biosólido o composta, sin embargo, por las características que el digestato tiene, como, la alta cantidad de materia orgánica, la naturaleza de ser el resultado de un tratamiento de materia orgánica en un proceso de biodegradación (anaerobio) y el contenido de nutrientes susceptibles al aprovechamiento, podrían catalogar al digestato como un compuesto similar a la composta susceptible a ser aprovechado. Desde el 2011, en CDMX, la composta esta normada en la NADF-020-AMBT-2011 basada en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Por lo anterior, es que se decidió hacer pruebas de coliformes fecales, salmonella, huevos de helminto y cuantificación de metales traza basados en los límites máximos permisibles especificados en la NADF-020-AMBT-2011.

Las pruebas de Cf, Snl y HH se hicieron en las instalaciones del UPIBI del IPN. Para estas se usó digestato acidificado con ácido sulfúrico (pH 5.5 aprox.), deshidratado a 70°C por 24hr y digestato fresco almacenado a $4 \pm 1^\circ\text{C}$ por 30 días. En cada uno de los casos se trabajó con 3 diluciones; 1, 10^{-1} y 10^{-2} , de cada dilución se hicieron 5 repeticiones y 1 blanco negativo.

En principio, tanto la prueba de Cf, como la de Snl, constan de una prueba presuntiva de crecimiento microbiológico en medios nutritivos y una prueba selectiva donde, los medios que hayan dado positivo con la prueba anterior, son cultivados en condiciones específicas.

3.3.6.1. *Salmonella ssp.* Una vez pasando la prueba presuntiva, los reactivos positivos, se incuban durante $24 \pm 2\text{hr}$ a $41 \pm 0.2^\circ\text{C}$ en solución salina con Caldo de tetrionato. Se considera positivo a salmonella si el medio hace un vire de color naranja intenso. Los reactivos que den positivo se siembran de forma estriada en placas con agar nutritivo para hacer una identificación bioquímica. Se deben usar 3 medios nutritivos por cada reactivo positivo, en este caso se usó Agar SS, sulfito bismuto y XLD. Dichas placas se incuban a 35°C por 24hr, donde se buscan colonias translucidas, transparentes u opacas y algunas veces con centro negro para confirmar *salmonella ssp.*

3.3.6.2. Coliformes fecales. Después de la prueba presuntiva, los casos positivos (reactivos que presentaron turbidez y/o gas) son incubados en caldo EC a 44.5°C por 24hr como prueba confirmativa. Se considera positivo a Cf si el medio presenta turbidez y producción de gas en dicho periodo. Deben usarse por lo menos 3 diluciones distintas y 5 tubos por cada dilución,

es decir, 15 reactivos. Los resultados de tubos positivos deben ser consultados en la tabla estadística de probabilidad que dan un “Numero Más Probable” por gramo de muestra (NMP/g). Para este caso se consultó en la tabla H.8.4.6. del anexo III de la NOM-210-SSA1-2014.

3.3.6.3. Huevos de helminto. Para la detección de huevos de helminto se usó el método de detección por flotación, el cual supone que, dichos parásitos, flotan en soluciones más densas como una solución con sulfato de zinc. La densidad de la solución debe estar entre 1.18 y 1.2. Se toma de cada muestra un triplicado, la cual debe centrifugarse con agua desionizada para crear una pastilla, esta se suspende en la solución de sulfato de zinc, y se centrifuga de nuevo. Finalmente, el sobrenadante se recoge con un

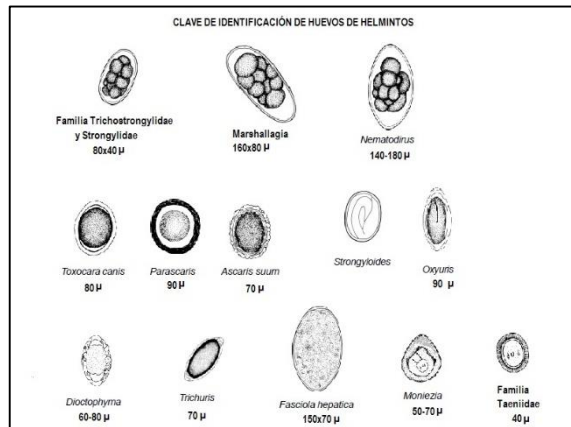


Figura 20 Clave de identificación de huevos de helminto. Dibujo por María Laura Vignau, adquirido de <http://parasitologia-veterinaria.blogspot.mx> al 14/04/17

aza para colocar una muestra en un portaobjetos, esta muestra se tiñe con lugol para realizar un barrido al microscopio de cada muestra por triplicado. Los parásitos se reconocen a través de su fisonomía. En la Figura 20 se muestra la clave de identificación de huevos de helminto.

3.4 PRUEBAS BIOLÓGICAS

Con el objetivo de probar que las características físico-químicas que se encuentran en el digestato lo califican como apto para ser usado en forma de nutrición vegetal, se diseñó un experimento para medir sus cualidades fertilizantes de suelo, dados los valores detectados que contiene de NPK, así como las cualidades benéficas para el suelo como lo es la materia orgánica y los precursores de ácidos húmicos. De esta forma, se probó de forma práctica logrando así un resultado más allá de una comparación de normas ambientales y fuentes bibliográficas. El experimento se basó en el método “Mitscherlich” y en distintos trabajos de comparación de desempeño de fertilizantes comerciales frente a fertilizantes orgánicos y excretas, así como los parámetros de calidad de suelo en cuanto CE, pH y materia orgánica recomendados (Awodun et al., 2015; Dania et al., 2014; Tripepi, 2014)



Figura 21. Distribución aleatoria de 12 unidades experimentales en maceta con sistema de riego de goteo por gravedad.

En principio el método mencionado consiste en hacer cultivos en maceta que permitan hacer proyecciones a cultivos aplicados en campo, con la ventaja de que el cultivo en macetas permite controlar algunas variables así como aislar tratamientos de suelo. En el experimento se usaron 120 semilla de lechuga (*Lactuca sativa var. crispata*).

Para la comparación experimental de tratamientos para suelo se usó el digestato acidificado con H₂SO₄ (pH 6.5) de la FORSU, generado en los frascos de 1,250ml, como biofertilizante, fertilizante comercial marca Vigoro 17-17-17, composta madurada por 2 años proveniente de la PCBP y con suelo solo, tomado de las áreas verdes del CIEMAD.

El cultivo en macetas se realizó dentro del invernadero instalado dentro del CIEMAD. Se usaron 12 macetas con el suelo del mismo invernadero y se regaron con 500ml de agua desionizada cada 2 días, el acomodo de las macetas se muestra arriba en la Figura 21.

3.4.1. Muestreo de suelo

- a. El lugar para la toma de muestra fue dentro del invernadero instalado en el área frente al estacionamiento del CIEMAD.
- b. El suelo que se muestreó fue entre 0 y 15 cm de profundidad en 3 espacios distintos, la mezcla de los 3 espacios fue homogenizada con método de cuarteo (Angeladaki et al., 2007).
- c. Se tamizó la muestra en colador de 5 mm aproximadamente, separándola de plásticos, vidrio, ramas etc.
- d. El total de la muestra pesó alrededor de 100kg, después de ser homogenizada y tamizada se obtuvieron 48 kg. Para la caracterización del mismo, se tomaron 3 muestras representativas.

3.4.2. Caracterización del suelo.

Se midieron por triplicado los parámetros más importantes para el método a aplicar:

- a. Sólidos volátiles para cuantificación de materia orgánica presente.
- b. Conductividad Eléctrica en (mS/cm).
- c. ORP (mv).
- d. Lignina por el método de lignina Klason.
- e. pH agregando 15ml de suelo compactado después de 3 golpes ligeros en una superficie plana en recipientes plásticos graduados con capacidad de 50ml, a los cuales se les agrego otros 15ml de agua desionizada (1:1 en volumen), en esa misma solución se midió conductividad eléctrica para estimar la salinidad del suelo. Lo anterior se hizo con medidores de pH/CE/ORP portátiles marca HACH.
- f. El nitrógeno total, con el método Kjeldahl utilizando equipo Buchi k340 y k350.
- g. Fosfatos totales con método HACH (PO₄⁻³) con equipo DR 200 y DR 900 de HACH.

La muestra de suelo a usar NO pasó por un proceso de esterilización. La caracterización por triplicado puede verse en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de la caracterización fisicoquímica inicial del suelo.

Muestra	ST%	HT%	pH	ORP	CE	SV%	Lig/SV%	PO ₄ ⁻³ %	N gN/kg
Suelo	92.30	7.70	7.367	83.0	2978.6	24.85	48.69	0.47	10.12
DS	±0.26	±0.26	±0.117	±7.211	±51.8	±0.81	±3.58	±0.08	±0.35
CV%	0.28	3.40	1.59	8.69	1.74	3.27	7.35	17.50	3.47

*Coef. D.V.: Coeficiente de variación; Lignina: g/kg de muestra. Los valores mostrados son el promedio de 3 unidades experimentales.

Otra característica importante del suelo es la densidad y la capacidad de absorción de agua, donde el suelo ocupa 600g/L y puede absorber hasta 400ml de agua desionizada por cada litro de suelo. Es decir, con una densidad de 0.6, la absorción máxima de agua del suelo es del 66% de su peso.

3.4.3. Características recomendadas por fuentes bibliográficas y ajustes en las condiciones del suelo.

- a. La proporción de tierra y materia orgánica 1:1 y 1.5:1 en volumen respectivamente (también se recomienda una tercera parte de material inerte como perlita o piedras pequeñas).
- b. En caso de obtener una lectura de la muestra ya tamizada de conductividad eléctrica menor a 1500 mS/cm se debe agregar más tierra sin tamizada sin M.O., caso contrario de tener una lectura mayor a 2500 mS/cm se agregará más materia orgánica (Tripepi, 2014).
- c. La materia orgánica presente debe de ser material ya descompuesto y recalitrante como la lignina. Esto es de gran importancia pues la M.O. también representa electronegatividad la cual es benéfica para el suelo por su capacidad de intercambio de cationes. Debe evitarse el uso de materia orgánica fresca o aserrín de maderas oleaginosas y relativamente frescas.
- d. En general, se recomienda un pH en el suelo entre 6.5 y 7.5, los ajustes de basicidad pueden hacerse con ácido sulfúrico y los de acides con carbonato de calcio e hidróxido de calcio (Masley, 2012).

Basado en lo anterior, se hace evidente que el suelo caracterizado está por encima de los valores recomendados (aunque no significativamente en algunos casos) para un suelo apto para el cultivo de hortalizas en términos de CE, MO y pH.

Para disminuir las variantes del experimento se utilizó el suelo sin modificación.

3.4.4. Semilla y contenedores.

Como se mostró en la Figura 21, se prepararon 12 macetas a las cuales se les agregó 500g de tezontle al fondo y 2,000g de suelo. El ensamble destacan las siguientes consideraciones:

- a. Semilla de lechuga (*Lactuca sativa* var. *crispa*), 10 semillas por maceta plantadas en 3 hileras paralelas. Las semillas marca “AQTEX” se adquirieron de la empresa “Agroquímicos Texcoco”.
- b. La lechuga prefiere una temperatura cálida/fresca y húmeda, está lista para cosechar entre 20 días y 1 mes. Estas características pueden no ajustarse al tiempo y condiciones reales del experimento (Principios de mayo 2017).
- c. En la prueba de germinación con las semillas de lechuga, acelga y espinaca, en la que se usaron 20 semillas que se acomodaron dentro de una caja Petri de vidrio con base de papel filtro para mantener la humedad y a partir de la primera semilla en germinar, se dio un periodo de 4 días para hacer el conteo total de semillas germinadas; en dicha prueba la lechuga tuvo su primera germinación a las 24hr y tuvo un 90% de germinación al cabo de 4 días como se muestra en la Tabla 15 (Abdullahi et al., 2008).
- d. En base a la prueba de germinación y dado que se usaron en total 10 semillas por maceta se espera que mínimo germinen 9. Este dato será tomado en cuenta para dar resultados en términos de fitotoxicidad al momento de la germinación en las macetas.
- e. Los contenedores tienen una profundidad de 25cm y una capacidad de 3.5 litros (Liu et al. 2014).

Tabla 15. Prueba de germinación de semillas de lechuga, acelga y espinaca.

Semilla	Número de semillas por día						A 6 días % de germinación
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	
Lechuga	8	12	15	18	-	-	90.0%
Acelga	N/A	4	8	14	15	-	75.0%
Espinaca	N/A	N/A	1	2	5	7	35.0%

Semillas iniciales 20, seguidas hasta por un periodo de 6 días; para lechuga y acelga todas las semillas estuvieron en una caja Petri, para la espinaca se usaron 5 cajas Petri.

Preparación de Tratamientos. Para el cálculo de fertilizantes por kg de suelo, se requirió hacer una serie de estimaciones en base a lo sugerido por distintas fuentes bibliográficas.

Brady y Weil (2017) consideran que, en campo, el cálculo de fertilizante a aplicar se hace en kg de fertilizante por hectárea (kg/ha), para dicho caso, al momento de hacer experimentos en maceta para aplicaciones prácticas en campo, se considera que cada hectárea tiene de 2 millones a 2.25 millones de kilogramos de suelo hasta 15cm de profundidad, por lo que, si la recomendación general de cultivos de lechuga es de 200 a 250kg de nitrógeno por hectárea, entonces por cada kg de suelo debería fertilizarse con 0.1g de nitrógeno aproximadamente. Es probable que no sea la mejor relación pero permite tener un acercamiento o al menos un punto de partida para futuros experimentos. Mientras más pequeña la maceta mayor es el rango de diferencia de comportamiento del suelo en campo al de maceta en cuanto a drenaje, temperatura,

oxigenación y percolados (Liu et al., 2014; Sárdi, 2015). Finalmente, el experimento se diseñó de la siguiente forma:

- a. 4 reactivos por triplicado, es decir 12 unidades experimentales. Suelo solo (BN-), Suelo/Composta, Suelo/Digestato líquido y Suelo/Fertilizante (BP+). Las características físico-químicas del digestato, composta y fertilizante de valores de NPK, SV y lignina se muestran en la Tabla 16.
- b. La cantidad a agregar de cada tratamiento experimental se calculó en base al nitrógeno presente en 51 gramos de digestato fresco diluidos en 150ml de agua desionizada, es decir 0.24g de nitrógeno.
- c. BP+ = 1.413g de fertilizante NPK 17-17-17 marca Vigoro diluidos en 150ml de agua desionizada.
- d. BN- = Únicamente suelo.
- e. Suelo/Composta = 11.57g de composta diluida en 150ml de agua desionizada.
- f. Suelo/Digestato = 51g de digestato fresco acidificado con H₂SO₄ a pH 6.5 diluido en 150ml de agua desionizada. (Awodun et al., 2015; Dania, Akpansubi, Eghagara, 2014).
- g. Todas las mezclas antes descritas se hicieron el 27/04/17
- h. Se hizo una única aplicación al inicio del experimento.

Tabla 16. Caracterización de digestato, fertilizante y composta.

Muestra	ST	HT	pH	CE	SV	Lig	NTK _{BS}	K _{BS}	P _{BS}	PO ₄ ⁻³ _{BS}	Mg _{BS}	Ca _{BS}
Promedio % ** y DS												
Fertilizante	99.0	1.0	2.9	488533	ND	ND	16.0	16.0	19.6	19.6	ND	ND
	±0.0	±0.0	±0.1	±40411	NA	NA	±0.1	N/A	±0.1	±0.1	NA	NA
Composta	93.6	6.4	7.9	14032	42.9	80	2.2	1.6	1.1	0.18	0.66	6.1
	±0.1	±0.1	±0.1	±846	±5.3	±10	±0.2	±0.1	±0.0	±0.02	±0.04	±0.4
Digestato	8.8	91.2	6.4	26514	56.9	161.6	5.3	3.5	0.7	0.15	0.83	5.2
	±0.1	±0.1	±0.1	±6762	±2.3	±5.6	±0.3	±0.1	±0.0	±0.03	±0.08	±0.4

Lig: Lignina g/kg de SV, NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl, ** a excepción de pH y CE (mS/cm)

3.4.5. Plantado. El 27 de abril del 2017 se plantó la lechuga, 10 semillas por maceta. Después de 19 días desde el sembrado (16/05/2017), se cortaron los brotes más débiles para dejar el ejemplar más fuerte y desarrollado de cada semilla por cada maceta.

Una vez a la semana, durante 3 semanas, se registró el desempeño en cada maceta, basándonos en altura, grosor, número de hojas, longitud y ancho de las hojas de las plantas de lechuga. Al mismo tiempo se llevó un registro del promedio semanal de temperatura, humedad y condiciones climáticas.

3.4.6. Sistema de riego. Para el riego se instaló un sistema de goteo por gravedad ajustado aproximadamente a ½ galón por hora, la alimentación de agua para cada maceta se hacía por una manguera de 1/16 de pulgada regulada por una válvula de paso. Esto se hizo para cada

serie de tratamiento, es decir 12 unidades. Estas válvulas se acoplaron a una sola cubeta de 20 litros de capacidad instalada a 1 metro de altura sobre el suelo.

Los primeros 15 días después del sembrado, se regó con 500ml cada 2 días para mantener humedad alta en el suelo para el periodo de germinación. Después de periodo de germinación, el riego se hizo considerando condiciones del suelo y temperatura local. En promedio, la temperatura dentro del invernadero fue de 29°C y humedad relativa de 30%, con algunos días de lluvia intermedios y algunos picos de temperatura calurosa, por lo cual no se pudo ajustar un sistema continuo de riego razón por la cual este fue intermitente.

3.5 Análisis estadístico.

Los resultados se expresan como valores promedio de tres replicas y su correspondiente desviación estándar (DS), el procesamiento estadístico de las observaciones inicio con una primera fase en la que se obtuvo la estadística descriptiva de todas y cada una de las variables para su organización y clasificación. La segunda fase consistió en el análisis comparativo de las variaciones temporales de las variables y de las relaciones entre ellas por medio de la aplicación de métodos estadísticos inferenciales utilizando tanto pruebas paramétricas como no paramétricas, en tanto que las asociaciones entre variables se evaluaron por análisis bivariado calculando los coeficientes de correlación paramétrica de regresión lineal, además de pruebas de ANOVA uni y bifactorial. Los análisis estadísticos se ejecutaron con el programa Sigma Plot 12.0 (Systat Software, Inc) y las diferencias se consideraron significativas solo cuando $p < 0.05$.

4. RESULTADOS

4.1 Características físico-químicas de sustrato e inóculo.

Se procedió a obtener los parámetros estadísticos descriptivos de las variables fisicoquímicas determinadas tanto para el sustrato como para el inóculo, se determinó también la presencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre los parámetros evaluados en las dos épocas estacionales (temporada de lluvias y temporada seca), para ello se aplicó una prueba de T de Student, la información se resume en la Tabla 17.

Tabla 17. Características fisicoquímicas del sustrato (FORSU) por temporada

Sustrato	ST	HT	pH**.	ORP**	CE**	SV	Lig	N **	PO ₄ ⁻³ _{BS}	P _{BS}	K _{BS}	Mg _{BS}	Ca _{BS}
Promedio % ** y DS (N=5)													
T. Seca	28.9 ±3.5	71.1 ±3.5	4.55 ±0.05	47 ±1.73	17416.7 ±920.7	80.5 ±0.1	N/A N/A	7.95 ±0.002	- -	0.4 -	2.7 -	0.45 -	2.3 -
T. Lluvia	25.0 ±3.1	75.0 ±3.1	4.60 ±0.01	164.6 ±7.57	3716.7 ±16.1	70.1 ±2.7	16.1 ±0.5	5.78 ±0.001	0.21 0.0	0.3 -	1.7 -	0.4 -	1.9 -
T-Stnt	P>0.05	P>0.05	P>0.05	P<0.05	P<0.05	P<0.05	N/A	P<0.05	N/A	N/A	N/A	NA	N/A

N**: gN/kg gramos de nitrógeno por kg de muestra secada a 70°C por 24hr. PO₄³, P, K, Mg y Ca están expresados en Base seca. Los valores mostrados son el promedio de mínimo 3 datos obtenidos. N/A; No Aplica, no se había montado la prueba o no se contaba aun con el equipo necesario. Lig: Lignina%/SV.

** CE promedio en mS/cm., ORP promedio en mv, Ng/kg, promedio de gramos de nitrógeno por kg de muestra seca.

4.1.1 Variabilidad en los parámetros fisicoquímicos de la FORSU

Los resultados presentados en la Tabla 17 permitieron identificar que variables de la FORSU difieren significativamente entre temporadas correspondiendo a ORP, CE, SV, N, P, K, Mg y Ca. Situación que impacta en el cálculo de la carga inicial que se proporciona a los biodigestores. El sustrato se mantuvo sin diferencia significativa entre temporadas en cuanto a ST, HT y pH, a pesar de las lluvias, esto posiblemente se deba a que la composición de la FORSU de la CDMX se mantiene relativamente constante, esto también muestra que, el muestreo en ambos casos fue de material fresco. A pesar de que los ST entre temporada no mostraron diferencia, los SV (que se calculan en base a los ST) si mostraron diferencia significativa, así como la CE, el ORP y el NTK, donde, los valores más bajos fueron en temporada de lluvia. Esto es fácil de entender si se considera que la FO que llega a la PCBP se deposita en pilas a cielo abierto. Con ello, las precipitaciones pluviales que caracterizan dicha temporada, “lavan” la FO diluyendo así sus propiedades, dichos cambios afectan de forma significativa la producción de biogás en los digestores, lo cual, se explicará a detalle más adelante.

4.1.2 Variabilidad en los parámetros fisicoquímicos de efluentes que se emplearán en la DA.

Con relación a las características fisicoquímicas de las muestras de efluentes de la PCBP que se emplearon como inóculo, se analizaron efluentes provenientes de dos sitios dentro de la planta, en cada caso, se analizaron con y sin pre-incubación y en las dos temporadas del año. En la Tabla 18 y Tabla 19 se resumen los parámetros evaluados.

Tabla 18. Caracterización de muestras de efluentes sin pre-incubación.

Efluente	ST%	HT%	pH	ORPmv	CE	SV%	Ng/kg _{BS}
T. Seca	5.64 ±0.68	94.36±0.68	6.89±0.04	-284±4	33347±1069	52.76±1.82	1.86±0.02
T. Lluvia	4.79±0.26	95.21±0.26	8.33±0.03	-324±3	30047±50	33.78±0.22	0.81±0.01
T-Stnt	P>0.05	P>0.05	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>

Tabla 19. Comparación y caracterización físico-química de efluente incubado para su uso como inóculo en la DA.

Inóculo	ST	HT	pH**	ORP**	CE**	SV	Lig	N**	PO ₄ ³⁻ BS	P _{BS}	K _{BS}	Mg _{BS}	Ca _{BS}
Promedio % y DS (N=3)													
T. Seca	4.77 ±0.62	95.23 ±0.62	8.33 ±0.01	-335.67 ±3.79	34772.0 ±263.3	49.29 ±1.26	N/A	0.17 0.00	0.21 ±0.04	0.22	0.9	0.3	1.6
T-Par	P>0.05	P>0.05	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	<u>N/A</u>	P<0.05	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T Lluvia	5.09 ±0.68	94.91 ±0.68	8.31 ±0.35	-407.67 ±2.52	33630.3 ±439.2	31.83 ±0.21	40.03 ±7.62	0.21 ±0.01	0.18 ±0.01	0.22 0.0	1.02	0.3	1.6
T-Par	P>0.05	P>0.05	P>0.05	<u>P<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	P>0.05		<u>P<0.05</u>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T-Std	P>0.05	P>0.05	P>0.05	<u>P<0.05</u>	<u>P<<0.05</u>	<u>P<0.05</u>	N/A	<u>P<0.05</u>	P>0.05	N/A	N/A	N/A	N/A

** N: gN/kg BS, pH y CE (mS/cm), ORP (mv). Lig: Lignina g/kgSV

T-Par: T- Pareada, es la comparación estadística entre 2 datos de una misma variable que tuvo una modificación en el tiempo, en este caso, se comparó el efluente de cada temporada contra las características después de incubar 15 días. Al final también se hace una comparación estadística entre temporadas ya incubados.

El análisis de la variación que presentan los parámetros fisicoquímicos del efluente por temporadas y por acción de pre- incubación (50°C por 15 días) mostro que los parámetros de ST y HT no presentan diferencia significativa entre temporadas, sin embargo, si presentó variación en el pH entre temporadas, probablemente debido a que la primera muestra se tomó de un canal más cercano a las pilas de composta y la segunda se tomó de un canal más cercano al cárcamo. Posiblemente en el camino del canal el líquido se alcalinizo un poco (suelo alcalino de Texcoco) o se volatilizó mayor cantidad de AGV en dicho recorrido, provocando eventualmente un aumento en el pH. Similar al caso del sustrato en temporada de lluvias, en el efluente propio de dicha temporada, hubo significativamente menos cantidad de SV, CE y NTK, de nuevo, probablemente se deba a la “dilución” causada por las precipitaciones pluviales de la temporada.

Por temporadas. En cuanto a las diferencias entre el efluente sin incubar y el incubado a 55°C por 15 días en cada temporada, los valores de ST, HT no mostraron diferencia en ambos casos. El pH de la muestra de efluente del 26 de abril mostro diferencia significativa después de incubación, acción que usualmente se debe por el consumo del hidrógeno por bacterias metanógenas. Por otra parte, el ORP en ambos casos disminuyó, lo cual habla de un proceso de metanogénesis después de incubación, es decir, el proceso de incubación en ambos casos fue efectivo en el desarrollo de arquea metanógenas.

Entre temporadas no hubo diferencia entre ST, HT ni pH. El efluente incubado por 15 días del 26 de abril parece tener mejores valores en cuanto a SV, NTK y CE, por otro lado, el ORP del efluente del 29 de agosto es más electronegativo, por lo tanto, se podría suponer que existe una carga metanógena más grande y por ende, es potencialmente mejor inóculo, lo cual se discute cuando se hace la comparación de producción de biogás por g de SV más adelante.

4.2 Seguimiento de la producción de biogás en digestión húmeda y seca.

Se ensamblaron sistemas de DA termófila húmeda y seca en lote a escala laboratorio con seguimiento de producción de biogás. Se procesaron muestras de FORSU de la CDMX con los inóculos previamente caracterizados en distintas temporadas del año, para analizar la variabilidad en la producción del biogás que pueda haber al usar FORSU en distintos periodos del año.

4.2.1 Producción de biogás en los sistemas de digestión húmeda. En la Figura 22 se muestra una gráfica comparativa de la producción de biogás por digestores ensamblados con el inóculo y sustrato de distinta temporada, con un tiempo de seguimiento de 30 días.

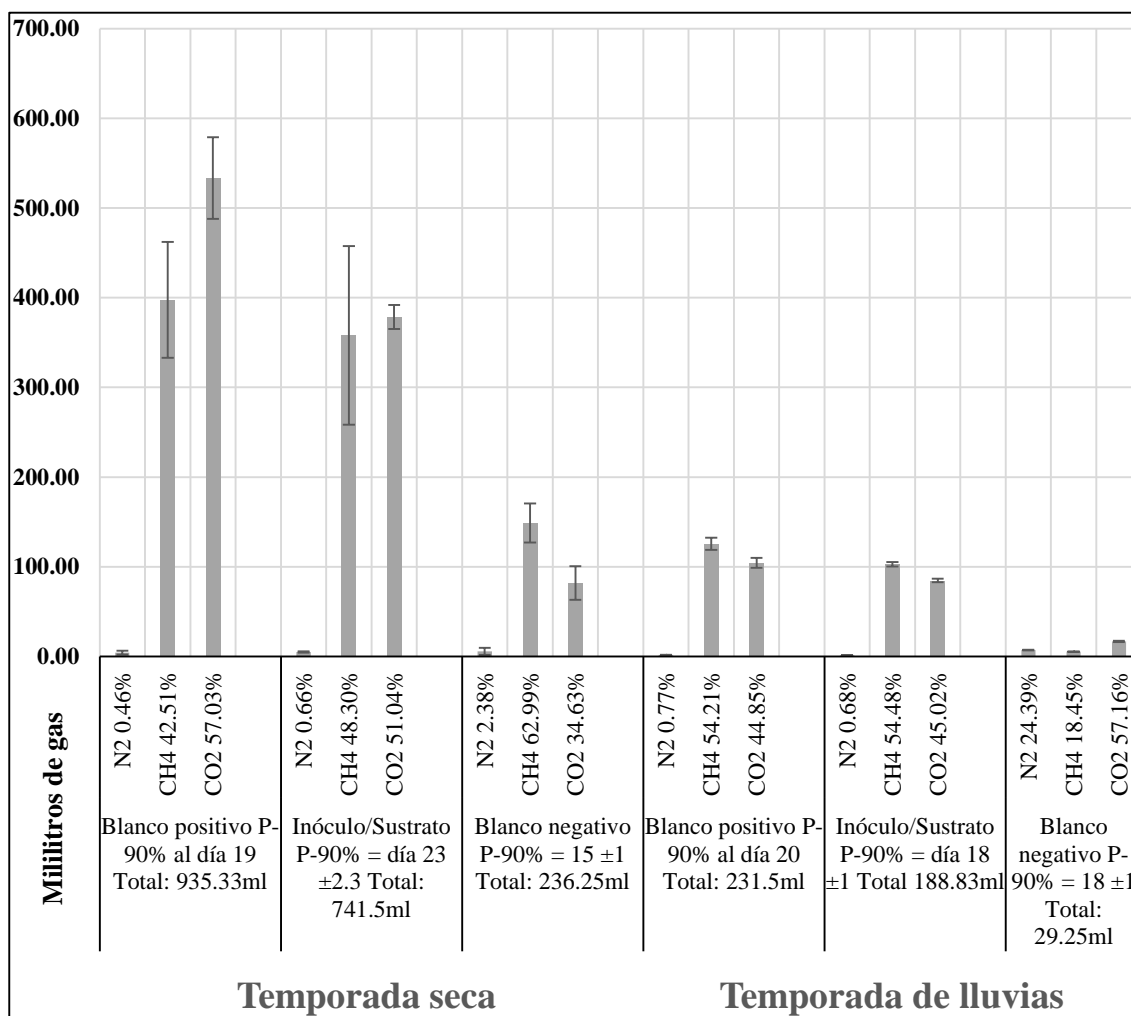


Figura 22. Comparación de producción de biogás de la PBM entre temporada seca y de lluvias en proceso de DA húmedo.

En este periodo se identificó el día en el que se produce el 90% del total del biogás (P-90%) con la intención generar datos para un proceso más eficiente en próximos experimentos. Se presentan los valores del BP+ que es inóculo con celulosa en relación 1:1 base SV en 60g, un tratamiento de Inóculo con Sustrato 1:1 base SV en 60g y BN, que es el inóculo solo. La producción por temporada de biogás en la PBM por cada componente se midió usando el método de desplazamiento de embolo.

El biogás generado en la temporada seca difiere significativamente del generado en temporada de lluvias al ser cerca de 4 veces mayor la cantidad generada en temporada seca, (t-Student $P < 0.05$). Diferencias similares pueden notarse entre cada uno de los tratamientos. Esto probablemente se deba a la diferencia que antes se resaltó que existe entre ambas temporadas en cuanto al contenido de SV y NTK. El método de la PBM supone que los SV que se encuentran en el inóculo son la carga estimada de microorganismos dentro de este medio y los SV del sustrato suponen el alimento estimado para dicha carga de microorganismos. En este sentido, dado el hecho de que tanto el inóculo como el sustrato de temporada de lluvias presentaron una diferencia

significativa con valores menores de SV respecto a los encontrados en temporada seca, se podría asegurar que en temporada de lluvias los SV (fuente de carbón) y el NTK (fuente de nitrógeno), se diluyen provocando con ello una baja producción de biogás. A pesar de lo anterior, la PBM mostró en ambos casos que el BP+ generó mayor cantidad de biogás que el tratamiento con sustrato/inóculo y el BN- a su vez generó menor cantidad de biogás que los 2 anteriores.

Respecto a la correlación de las variables con producción de biogás en la PBM (que es una digestión húmeda), se hizo una regresión lineal con los datos de ambas temporadas. Los SV libres de lignina (SVLL) del sustrato más los SVLL del inóculo, es decir, SV a los que se les restó el porcentaje de lignina que los compone (lignina Klason), explican de mejor forma la producción que hubo de biogás. Para lograr esto, se midió la lignina que el sustrato de ambas temporadas contenía, el contenido de lignina del inóculo se estimó restando los SV iniciales (que contenía el efluente incubado por 15 días) menos los SV del digestato de los BN- de cada temporada, es decir, se restó el material recalcitrante volátil, suponiendo que al menos el 95% de este se componía de lignina, ya que, no se midió lignina del inóculo inicialmente dada la baja cantidad de ST que contenía. En la Tabla 20 se muestran los valores de la regresión lineal que correlaciona los SV consumidos con la producción de biogás y la comparación de esta relación entre temporadas.

La regresión lineal usando ambos valores disminuye significativamente respecto a los valores obtenidos por separado (por temporada), esto puede deberse al hecho de la dilución que existe en los compuestos en temporada de lluvias y, por lo tanto, la dinámica del proceso de digestión cambia de tal forma que el proceso experimental en ambas temporadas fue efectivo para comprobar el poder de metanización del inóculo con sustrato obtenido de la PCBP pero los cálculos en base a la relación 1:1 de SV no garantizan los mismos resultados si las muestras son tomadas en distintas temporadas.

Tabla 20. Correlación en la producción de biogás por temporadas estacionales respecto a los sólidos volátiles libres de lignina, en sistema de DA húmedo.

Temporada	Muestra	SVLL (g) consumidos	Biogás (ml)	Correlación por temporada	Correlación entre temporadas	
Seca	Inóculo solo	0.381	215.0	$\text{Biogás} = 42.445 + (530.917 * \text{SVLL})$ $R = 0.996 \quad R^2 = 0.993$		
		0.381	267.0			
		0.381	264.0			
	Sustrato Inóculo	1.456	815.0			
		1.456	807.0			
		1.456	767.0			
		1.758	975.0			
	Celulosa/Inóculo	1.758	1022.0			$\text{Biogás} = -167.984 + (561.413 * \text{SVLL})$ $R = 0.843 \quad R^2 = 0.710$
		1.758	975.0			
		1.758	975.0			
Lluvia	Inóculo solo	0.264	37.0	$\text{Biogás} = -30.207 + (228.385 * \text{SVLL})$ $R = 0.956 \quad R^2 = 0.914$		
		0.264	31.0			
		0.264	31.0			
	Sustrato/Inóculo	1.010	161.7			
		1.010	183.0			
		1.010	186.0			
		1.010	193.0			
	Celulosa/Inóculo	1.104	288.0			
		1.104	215.0			
		1.104	217.7			
		1.104	237.0			

4.2.2. Producción de biogás en los sistemas de digestión seca con ajuste de pH

Teniendo en mente los datos de las Tablas 10, 11, 12 y 13 en las que se muestra el proceso de preparación del inóculo para digestiones secas, se hicieron digestiones usando como sustrato FO tomada de la PCBP y el inóculo con pH ajustado usando NaOH y Ca(OH)₂ en una relación 2:1 w/w de inóculo tratado por sustrato. En la Figura 23 se muestra la gráfica comparativa de producción de biogás de ambos tratamientos.

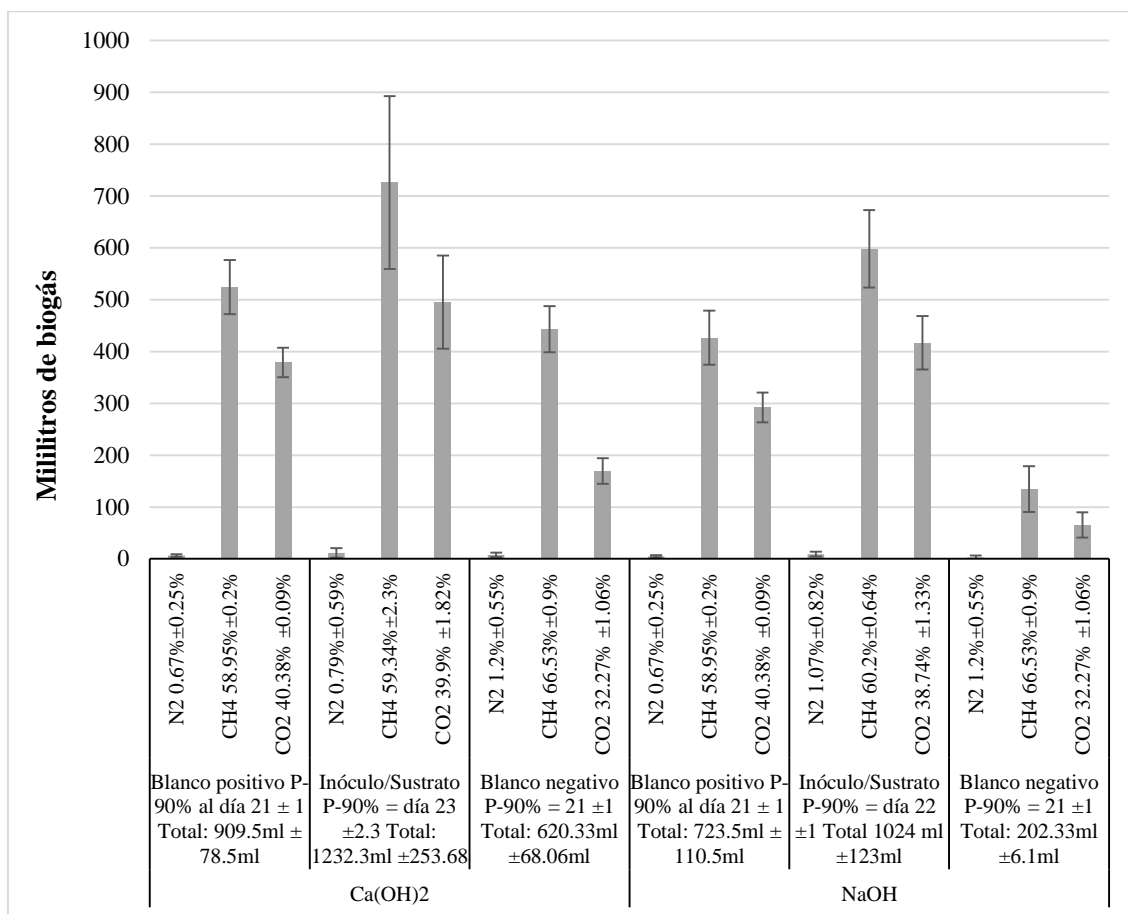


Figura 23. Producción de biogás en viales con inóculo aclimatado usando Ca(OH)₂ y NaOH.

En el caso de estos tratamientos, los BP+ (viales con celulosa) no generaron más que aquellos con sustrato. Esto a pesar de que al momento de ensamblar los viales, se procuró que tanto el tratamiento de I/S como el de celulosa/sustrato tuvieran la misma cantidad de sólidos volátiles libres de lignina (la celulosa es papel filtro que tiene menos del 0.1% de lignina Klason) así como la misma humedad y misma cantidad de inóculo. Esto posiblemente se deba al margen de error de detección de lignina no soluble en ácido que el método de lignina Klason pueda tener, por lo tanto, al agregar los gramos de SV en el BP+ se calculó agregar menos de lo requerido. Sin embargo, la producción de biogás mostró ser satisfactoria en términos de ml de biogás por g de SV en ambos casos.

Para la comparación estadística de la producción de biogás entre dichos tratamientos, se hizo un ANOVA unifactorial para destacar la diferencia significativa que pudiera haber en la producción de biogás, específicamente enfocado en el porcentaje de metano. Así mismo se hizo una comparación con el biogás generado por el BN- y el BP+ respecto al tratamiento con I/S de cada uno. También, se hizo una comparación entre tratamientos de inóculo con sustrato, respecto al metano generado. Se usó la prueba de t-Student, no se encontró diferencia significativa entre las medias de ambos tratamientos ($P > 0.05$).

Al igual que con la PBM, para explicar la producción de biogás por tratamiento se hizo una regresión lineal con los SVLL. El biogás generado tanto por las digestiones inoculadas con tratamiento de NaOH así como las inoculadas con tratamiento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, difiere significativamente de sus respectivos BN- y BP+. Sin embargo, en ambos casos, el tratamiento con I/S generó más biogás que el BP+. En lo que respecta al metano generado en ambos tratamientos (tanto el de NaOH como el de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) por la mezcla con I/S hubo diferencia significativa ($P < 0.05$) de este con el generado por el BN-. El BP+ no difiere con ninguno de los dos anteriores en ambos tratamientos.

Como se mencionó antes, la producción de biogás fue mayor en el caso de la mezcla I/S respecto a los BP+ en ambos tratamientos. Esto probablemente se deba a que los digestores secos de 125ml se ensamblaron en razón de la cantidad necesaria de inóculo para el amortiguamiento del pH del sustrato y no en razón a los SV 1:1 como en el caso de la PBM. Por lo cual a los BP+ se les agregó una cantidad estimada de celulosa que fuera similar a los SVLL que se encontraban en los tratamientos con inóculo y sustrato. Claramente, los BP+ tuvieron menor cantidad de SV, por lo cual se generó menor cantidad de biogás que los tratamientos con I/S.

Selección de inóculo tratado. Por mantener menor humedad en el digestato, haber registrado ligeramente mayor producción de biogás, ser más económico, de manejo más sencillo y ser menos nocivo, se continuó con las digestiones secas en recipientes de 1,250ml aclimatando el inóculo con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, descartando así el uso de NaOH. En la Figura 24, se muestra la correlación entre ml de biogás por SVLL (g), usando los datos de las 2 digestiones húmedas y las 2 digestiones secas de 125ml.

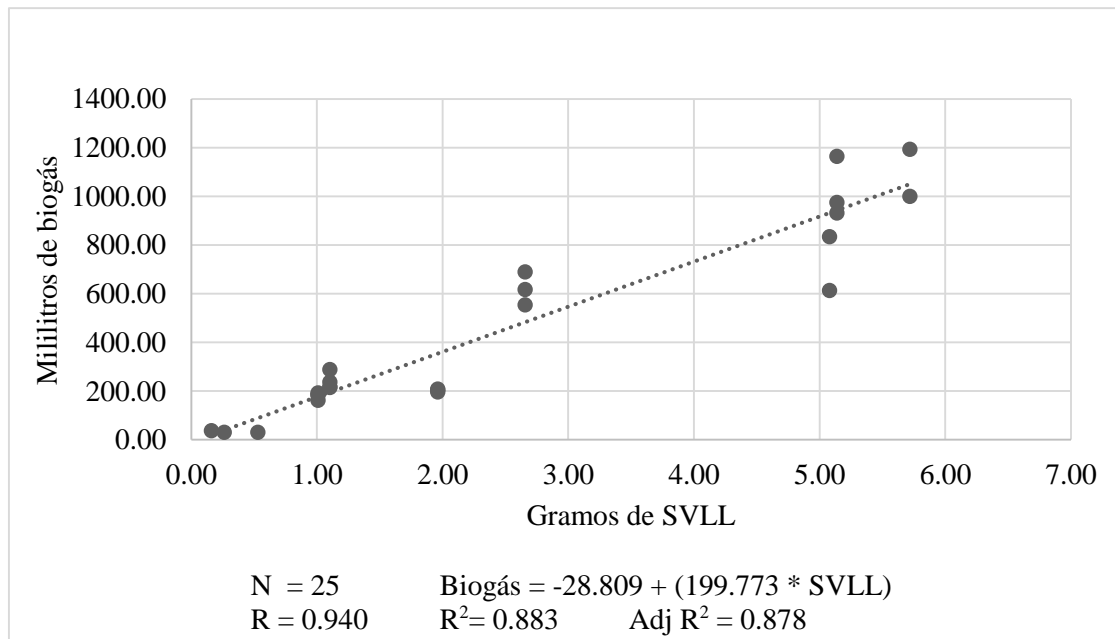


Figura 24. Regresión lineal con datos de PBM en temporada de lluvias, digestión seca con tratamiento NaOH y digestión seca tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ usando datos del I/S, BP+ y BN-.

4.2.3. Digestiones secas en recipientes de 1,250ml. El objetivo de escalar la digestión fue para conocer la diferencia que puede haber entre experimentos con distintos pesos y volumen, particularmente en el contenido de lignina, N, P y K, cuando los digestores se someten a las mismas condiciones. Por tal razón los resultados que se muestran a continuación, serán comparados con los digestores secos de 125ml. Para este experimento, la mezcla de S/I fue 50% sustrato y 50% inóculo w/w lo cual corresponde a 300g de sustrato y 300gr de inóculo, esto por triplicado y no se usaron BN- ni BP+.

En la Figura 25 se muestra la cantidad de biogás en mililitros (medidos con el método de desplazamiento de agua) que cada uno de los digestores generó, dicha cantidad se muestra dividida entre sus componentes.

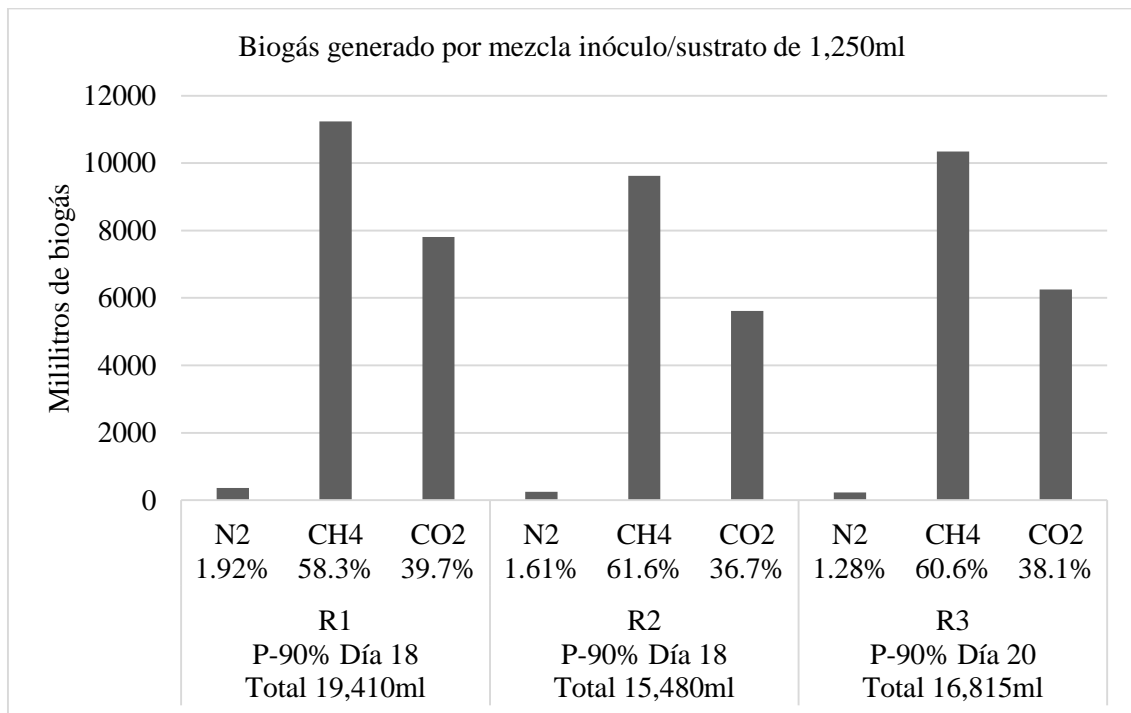


Figura 25. R1, R2 y R3: Digestor en recipiente 1, digestor en recipiente 2 y digestor en recipiente 3 respectivamente.

Entre las 3 unidades experimentales no existió diferencia significativa en la producción de biogás ni entre sus componentes (ANOVA unifactorial $p > 0.05$).

4.3 Características del digestato.

En la Tabla 21 se muestran los valores de la caracterización por temporada del digestato obtenido de cada PBM. La PBM es en principio una digestión húmeda y dichos valores serán comparados con digestiones secas más adelante. A pesar de que el objetivo de esta investigación no es la de comparar tipos de digestiones, se tienen los datos suficientes como para hacerlo como parte complementaria al trabajo.

Tabla 21. Caracterización del digestato derivado de DA de inóculo con sustrato de la PBM (Digestión húmeda) en temporada seca y temporada de lluvias. A 30 días.

Parámetro	Temporada		T-Student entre temporadas
	Seca N=3	Lluvias N=3	
pH	7.75 ±0.1	8.4± 0.2	P>0.05 No
ORP (mv)	-378 ±3.09	-352 ± 13.1	P>0.05 No
HT%	95.44 ±1.1	95.37 ±0.77	P>0.05 No
ST% _{BH}	4.56 ±1.1	4.64 ±0.77	P>0.05 No
SV% _{BH}	2.35 ±0.2	1.31 ±0.03	P<0.05 Si
Lignina Klason %SV	36.26 ±0.73	40.06 ±7.36	P<0.05 Si
NTK g/kg _{BH}	2.37 ±0.03	2.579 ±0.21	P>0.05 No
Fósforo T % _{BS}	0.18% ±0.02	0.21 ±0.03	P>0.05 No

Cada dato es el promedio de mínimo 3 unidades experimentales.

P>0.05 No: No hay diferencia significativa entre grupos prueba de t-Student.

P<0.05 Si: Existe diferencia significativa entre dos grupos usando prueba t-Student.

4.3.1. Caracterización al día 0 y día 30 de la digestión seca (Tabla 22).

Tabla 22. Características físico-químicas de mezclas de inóculo y sustrato procesadas por DA seca con diferentes tratamiento de álcalis, del digestato resultante y del biogás.

Parámetro	Media (N=3) y DS por periodo de cada parámetro de mezcla inóculo tratado y sustrato			
	Digestión 1. Inóculo pre tratado con Ca(OH) ₂		Digestión 2. Inóculo pre tratado con NaOH	
	Día 0	Día 30	Día 0	Día 30
HT%	79.67 ^a ±3.5	82.95 ^d ±1.4	82.87 ^a ±2.8	90.15 ^d ±1.2
ST%	20.33 ^a ±3.5	17.05 ^d ±1.4	17.13 ^a ±2.8	9.85 ^d ±1.2
pH	7.05 ^a ±0.1	8.38 ^c ±0.05	7.13 ^a ±0.09	8.5 ^c ±0.07
ORP (mv)	-205 ^a ±6.5	-406 ^c ±11.8	-180 ^a ±12.3	-405 ^c ±8.54
SV% _{BH}	13.27 ^b ±1.2	7.53% ^d ±0.1	11.80 ^b ±1.4	5.79 ^d ±0.2
Lignina%/SV _{BS}	16.06 ^a ±1.1	40.06 ^c ±7.6	16.06 ^a ±1.1	36.26 ^c ±0.7
SV/60g de mezcla (g)	7.96 ^a ±1.1	4.52 ^d ±0.4	7.08 ^a ±0.05	3.47 ^d ±0.4
SVLL/SV(g)	5.59 ^b ±0.9	2.69 ^c ±0.2	5.13 ^b ±0.1	2.21 ^c ±0.3
Biogás (ml)	N/A	1232.33 ^d ±253.8	N/A	1024.00 ^d ±123.9
Metano (ml)	N/A	725.88 ^c ±166.58	N/A	598.09 ^c ±7.79
%CH ₄ en biogás	N/A	58.8 ^c ±2.4	N/A	58.3 ^c ±0.3
NTK g/kg _{BH}	4.74* ±0.002	6.58 ^d ±0.34	4.60* ±0.007	4.70 ^d ±0.22
% PO ₄ ⁻³ _{BS}	0.14* ±0.01	0.21 ^c ±0.01	0.14* ±0.01	0.196 ^c ±0.01
%P total _{BS}	0.49* ±0.07	0.89 ±0.09	0.47* ±0.074	-
%K _{BS}	2.25* ±0.46	3.18 ±0.39	2.19* ±0.45	-
%Mg _{BS}	0.59* ±0.057	0.91 ±0.1	0.57* ±0.055	-
%Ca _{BS}	3.04* ±0.401	5.5 ±1.0	2.95* ±0.38	-

^a: p >0.05 No hay diferencia significativa entre grupos "Día 0" prueba de t-Student.

^b: p <0.05 Existe diferencia significativa entre dos grupos "Día 0" prueba t-Student.

^c: p >0.05 No hay diferencia significativa entre grupos "Día 30" prueba de t-Student.

^d: p <0.05 Existe diferencia significativa entre dos grupos "Día 30" usando prueba t-Student.

BH: Base húmeda, BS: Base seca, SVLL.: Sólidos volátiles libres de lignina, NTK: Nitrógeno total Kjeldahl

*Valores estimados en base al contenido calculado del inóculo y sustrato en razón de 30% inóculo y 70% sustrato.

A pesar de que no hubo diferencia significativa en valores como pH, ORP, lignina, producción de metano, ni porcentaje del mismo sobre el biogás, el digestato en el tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se mantuvo con menor humedad, la cual es un factor importante para mantener una digestión seca, lo que determinó que fuera elegida para su escalamiento, cuyo código de identificación será ICOH.

Por otra parte, se hizo la caracterización del digestato de los digestores de 1,250ml y se compararon los valores iniciales con los valores después de 30 días de incubación (Tabla 23)

Tabla 23. Características físico-químicas de la mezcla de ICOH más sustrato 1:1w/w procesada por DA seca, escalada a 1,250ml y del digestato resultante

Parámetro	Día 0	Día 30	T-Pareada
	Media N=5 y DS.		
HT%	80.53 ±2.07	91.2 ±1.17	Si P<0.05
ST%	19.47 ±2.07	8.8 ±1.17	Si P<0.05
pH	7.29 ±0.15	8.07 ±0.09	Si P<0.05
ORP (mv)	-255.33 ±25	-320.00 ±12.24	Si P<0.05
CE (mS/cm)	20975 ±15.28	28499 ±4327	No P>0.05
SV%	43.68 ±2.05	57.01 ±2.32	Si P<0.05
SV/600g (g)	61.11 ±11.92	27.53 ±4.19	Si P<0.05
Lignina%/SV _{BS}	16.06 ±2.86	29.02 ±1.41	Si P<0.05
SVLL/600(g)	71.21 ±6.25	19.58 ±3.31	Si P<0.05
TKN _{BH} g/kg	4.94 ±0.08	4.71 ±0.28	Si P>0.05
NH ₄ ⁺ _{BH} g/kg	0.44 ±0.02	3.34 ±0.15	Si P<0.05
%NTK _{BS}	2.5 ±0.81	5.3 ±5.2	Si P<0.05
%P _{BS}	0.43 ±0.01	0.79 ±0.03	Si P<0.05
%PO ₄ ⁻³ _{BS}	0.19 ±0.02	0.15 ±0.03	No P>0.05
%K _{BS}	0.74 ±0.01	3.5 ±0.12	SI P<0.05
%Mg _{BS}	0.77 ±0.03	0.83 ±0.08	No P>0.05
%Ca _{BS}	4.0 ±0.09	5.4 ±0.48	No P>0.05
Relación C/N	17.5	6.23	Si P<0.05

Los resultados del día 0 y día 30 de la Tabla 23 se compararon entre factores usando una prueba de T-Pareada. Todos los valores difieren significativamente entre ellos P<0.05.

4.3.2. Acidificación y deshidratación del digestato de viales de 1,250ml.

Un post tratamiento común del digestato es deshidratarlo para poder almacenarlo o usarlo de forma logísticamente más eficiente. Se sabe que el digestato tiende a perder nitrógeno en forma de NH_3 , principalmente por el pH alcalino y la exposición a temperaturas mayores a 20°C (Pantelopoulos, 2016), por tal motivo, para evitar dicha pérdida de nitrógeno, se acidificó el digestato con ácido sulfúrico hasta obtener un pH de 5.5. Para corroborar el efecto deseado, el digestato se deshidrató a 70°C por 24hr. Pasado este tiempo se caracterizó de nuevo físico-

químicamente el digestato. Como se muestra en la Tabla 24, se obtuvo un promedio de 33.1gNTK por kg de digestato en BS, cuando antes de deshidratado, en promedio había 4.8gNTK por kg de digestato fresco, lo cual se si se calcula en base a los ST, correspondería a 58.3g de NTK por Kg de digestato en promedio. Con esto se observó que a pesar de acidificar el digestato, hubo una pérdida de más del 50% de nitrógeno en el proceso (Tabla 24), por lo que si bien sigue siendo recomendable neutralizar el pH del digestato, parece valer la pena hacer uso de este sin deshidratar o separar del líquido.

Tabla 24. Caracterización fisicoquímica del digestato deshidratado.

Parámetro	Media (N=5)	DS.
ST%	98.0	±0.1
HT%	2.0	±0.1
pH	5.93	±0.03
ORP (mv)	67	±6.08
CE (mS/cm)	211968	±4327
SV%	56.9	±2.3
SVg/kgST _{BS}	557.4	±22.7
Lignina/gSV (g)	161.61	±5.56
NTK g/kg _{BS}	33.1	±1.9
PO4-3 _{BS}	0.15	±0.03
%P _{BS}	0.80	±0.04
%K _{BS}	3.54	±0.13
%Mg _{BS}	0.83	±0.09
%Ca _{BS}	5.43	±0.47

4.3.3. Metales Pesados, patógenos y parásitos en digestato.

De acuerdo a los límites máximos permisibles de metales pesados en biosólidos, composta y mejoradores de suelo, especificados en la NOM-004-SEMARNAT-2002 y NAD-DF-020-2011, en la Tabla 25 se muestran las cantidades de metales traza de la FO, inóculo, mezcla I/S al día 0 de los digestores de 1,250ml, digestato de digestión seca de 125ml, digestato de digestión seca de 1,250ml y composta en mg/kg BS. Al final se muestran los valores máximos permisibles por las normas antes mencionadas.

Tabla 25. Valores detectados de metales traza, comparados con los límites máximos permisibles de la NOM-004-SEMARNAT.2002 “excelentes mg/kg en base seca” y la NADF-020-AMBT-2011 calidad A.

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn	Hg	Ti
mg/kg BS									
FO ^{1**}	ND	ND	25.00	14.80	7.60	14.00	120.70	ND	284.45
Inóculo ^{2**}	ND	ND	46.90	24.95	13.60	26.00	178.10	ND	208.20
I/S día 0 ^{3**}	ND	ND	15.30	19.20	17.15	13.25	125.95	ND	329.15
I/S 125ml ^{4**}	ND	ND	16.30	52.80	28.00	9.45	381.70	ND	242.90
I/S 1,250ml ⁵	ND	ND	21.88 ±4.	53.13 ±7	19.90 ±6	13.97 ±3	223.60 ±30	ND	366.40 ±42
Composta ^{6**}	ND	ND	29.85	144.13	83.23	19.70	370.13	ND	470.35
NOM-004	41	39	1200.00	1500.00	300.00	420.00	2800.00	17.00	NA
NADF-020	0.1	0.7	70	70	45	25	200	0.4	NA

**Promedio de 2 valores. ¹Fracción Orgánica. ²Inóculo aclimatado para digestión seca. ³Mezcla de inóculo y sustrato de recipientes de 1,250ml al día 0. ⁴Digestato de digestor de 125ml inoculado con inóculo tratado con Ca(OH)₂. ⁵Digestato de digestores de 1,250ml. ⁶Composta adquirida de la PCBP, 2 años de añejamiento. N/A: No aplica. N/D: No detectable.

4.3.4. Resultados de prueba de patógenos y parásitos en biosólidos y composta.

4.3.4.1. *Salmonella* spp.

De una dilución de 10⁻¹, considerando la dilución de 4g de digestato deshidratado y digestato fresco en 36ml de agua de caldo de tetrionato, homogenizado e incubado por 22±2hr a 37°C±0.2°C. Posteriormente adicionando en 3 diluciones Caldo Selenito cistina, incubado de nuevo 24±2hr a 41°C±0.2°C.

Los tubos con vire de color naranja se sembraron de forma “estriada” en placas de agar ss, sulfito bismuto y XLD. Se incubó a 35°C por 24 horas. Se buscaron colonias translucidas, transparentes u opacas y/o con centro negro. En ninguno de los 3 medios hubo crecimiento que diera sospecha a una identificación bioquímica de *salmonella* spp.

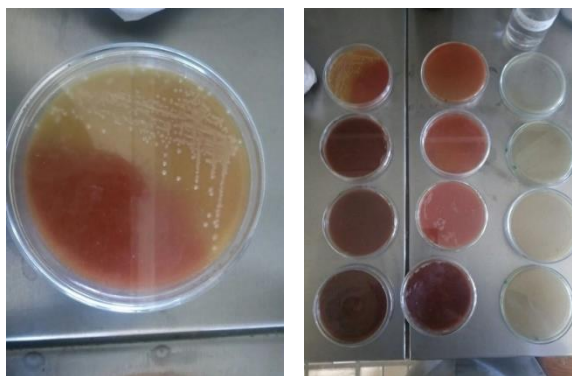


Figura 26. (Izquierda) Crecimiento no característico de *salmonella* spp. (Derecha) 3 medios distintos de cultivo para *salmonella* spp.

(Izquierda) Crecimiento no característico de *salmonella* spp. (Derecha) 3 medios distintos de cultivo para *salmonella* spp., por lo cual se reporta como que NMP/g de *salmonella* spp. es menor de 3 en base seca.

4.3.4.2. Coliformes fecales.

La prueba presuntiva en caldo lactosado para la detección de coliformes fecales en el digestato seco fue 5, 3, 2 positivos (turbidez y producción de gas) en las diluciones 1, 10^{-1} , 10^{-2} respectivamente y del digestato fresco fue 5, 5, 5, es decir positivo en todas las diluciones después de haberlas incubado a $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 24hr. De los tubos que resultaron positivos se tomó una muestra con aza y se incubó en medio EC para después ser incubados a $44.5^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ por 24hr.

Del digestato deshidratado solo hubo turbidez y gas en 2 tubos de los 5 que inicialmente dieron positivo con la primera dilución, las otras 2 diluciones no presentaron reacción alguna. En cuanto al digestato húmedo que dio positivo en todos los tubos de prueba presuntiva en las 3 diluciones, el resultado fue 5, 5, 0. Este resultado se consultó en la tabla 6 del apéndice normativo H.8.4.6 de la NOM-210-SSA1-2014, para NMP por g de muestra e intervalos de confianza del 95%, utilizando cinco tubos con 0.1g, 0.01g y 0.001 g de muestra seca.

Según la tabla, el resultado de 5 tubos positivos con 1g de muestra seca (10 ml de digestato fresco con 90% de humedad), 5 tubos positivos con 0.1g de muestra seca (1ml de digestato) y 0 tubos positivos con 0.01g de muestra (0.1ml de digestato), corresponde a 6 NMP/g, valor por debajo del máximo requerido por a NOM-004-SEMARNAT-2003.

4.3.4.3. Huevos de helminto.

Se tomaron 3 muestras de 4g tanto del digestato seco como del digestato líquido. Una vez centrifugada la muestra en la solución de sulfato de zinc se tomaron 4 azas del sobrenadante teñidas con lugol, mismas que se examinaron en portaobjetos con la ayuda de un microscopio. Esto se hizo por triplicado, es decir se examinaron 18 muestras en total, en las que no se encontraron huevos de helminto, por lo cual el resultado se reporta como < 1 huevo de helminto en 4g de muestra en base seca. Lo cual lo cataloga en clase A en cuanto a parásito según la NOM-004-SEMARNAT-2003.

4.3.4.4. Prueba biológica con plantas de lechuga.

Al sembrar directamente en suelo con distintos tratamientos las semillas de lechuga permitió cumplir con los dos objetivos de este experimento. El primero fue hacer una prueba de germinación/fitotóxica y, al mismo tiempo, conocer el valor nutricional expresado en desarrollo de la planta con un suelo abonado con digestato frente al abonado con composta, fertilizante y sin tratamiento.

La prueba de germinación duró 19 días en total, los primeros 5 días fueron del tiempo que tardó la semilla en germinar por encima del nivel del suelo, después de este día, se asignaron 14 días más para concluir el periodo de germinación y por ende la primera parte de la prueba. En la Figura 27 se muestra la imagen del último día de la prueba de fitotoxicidad.



Figura 27. Día 19 después de la primera semilla germinada en maceta.

En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos de la primera parte del experimento, la prueba de germinación/fitotóxica. Se usaron 10 semillas por maceta, fueron 12 macetas en total, 3 de tratamiento con digestato, 3 con tratamiento de composta, 3 con tratamiento de fertilizante comercial 17-17-17 y 3 sin tratamiento, por lo cual, los resultados se expresan en la suma de semillas germinadas por tratamiento, es decir, 30 semillas por tratamiento. El resultado de la prueba fitotóxica consideró el 90% de germinación que obtuvo la semilla de lechuga en la prueba mostrada en la Tabla 15.

Tabla 26. Comparación de germinación con distintos tratamientos.

Tratamiento	Día 0	Día 5	Día 11	Día 19	A 19 días % de la germinación
	Cantidad de agua agregada por día respectivamente.				
	1 litro/mta*	0.5 litro/mta*	0.5 litro/mta*	0.5 litros/mta*	
Suelo Solo	0	02/30	10/30	11/30	41%
Fertilizante	0	04/30	12/30	14/30	52%
Composta	0	02/30	15/30	17/30	63%
Digestato	0	05/30	22/30	21/30	78%

*Litro/mta: Cantidad de agua agregada por macetea. La corrección del 90% considera 27 semillas viables de 30.

Posteriormente al día 16/05/17, se dejó únicamente una planta por maceta por lo que se extrajeron manualmente todas las plántulas, excepto, la de apariencia más desarrollada y con mayor rigidez. Una vez teniendo solo una planta por maceta, se les asignaron 16 días más para desarrollo de la plántula. En la Figura 28 se muestra el desarrollo alcanzado por las plantas de lechuga al 26 de mayo del 2017.

Al día de corte se cuantificó de cada planta; el largo de la raíz en cm, número de hojas, altura de la planta en cm y peso de las hojas en gramos.



Figura 28. Desarrollo de las lechugas por tratamiento al día de corte.

4.4. ANALISIS ESTADISTICO

4.4.1. Digestato de 125ml y digestato de 1,250ml

En termino de porcentajes, se calculó si las características físico-químicas difieren entre digestato de digestores de 125ml con inóculo tratado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y sustrato, contra el digestato de los digestores de 1,250ml con inóculo tratado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y sustrato, es decir, al escalar la digestión 10 veces, pero en mismas condiciones. Esto con el objetivo de tener una idea de que se puede esperar al escalar 100 veces o 1000 veces. Dichos resultados se muestran en la Tabla 27, donde también se muestra si existe o no diferencia significativa.

Tabla 27. Digestato de digestiones secas con ICOH. 125ml y 1,250ml.

Tratamientos	ST%	HT%	pH	ORP (mv)	SV BS	Lig g/gSV	SVLL g/kgST	NTK BH	PO_4^{-3} BS	%P BS	%K BS	%Mg BS	%Ca BS
Digestato de D - 125ml	12.8	87.2	8.39	-404	645.3	230.3	415.1	6.57	0.18	0.96	3.4	1.0	6.3
	10.9	89.1	8.36	-404	649.5	240.8	408.7	6.24	0.15	0.83	2.9	0.8	4.8
	11.9	88.1	8.40	-410	609.8	219.7	390.1	6.57	0.24	0.89	3.2	0.9	5.5
Digestato de D - 1250ml	8.3	91.7	8.15	-305	506.7	145.8	360.9	4.90	0.13	0.73	3.6	0.8	5.2
	8.1	91.9	7.94	-315	664.3	184.3	480.0	4.76	0.15	0.84	3.6	0.9	5.9
	7.6	92.4	8.07	-330	547.5	167.2	380.4	4.76	0.14	0.78	3.4	0.7	5.0
T- Student	P> 0.05		P<0.05	P<0.05	P>0.05	P<0.05	P>0.05	P<0.05	P>0.05	P>0.05	P>0.05	P>0.05	P>0.05
*U-MW		U-MW	T-Sdt	T-Sdt	T-Sdt	T-Sdt	T-Sdt	T-Sdt					*U-MW

D – 125ml: Digestión en recipiente de 125ml. D – 1250ml: Digestión en recipiente de 1,250ml.

*U-MW: Prueba estadística de U de Mann Whitney

Las características físico-químicas del digestato de los digestores de 1,250ml, se asemeja más al generado en viales con tratamiento de NaOH que al tratado con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Esto debido a la humedad, pues al haber mayor humedad en el digestato, la mayoría de los valores se “diluyen”, sin embargo, en parámetros que se calculan en base seca, no hay diferencia significativa. Por otra parte, la relación de I/S entre viales de 125ml y 1,250ml fue diferente. Los primeros se fue 2:1 w/w I/S y los últimos fueron en relación 1:1 w/w. Siendo el inóculo más

húmedo que la FO, naturalmente la humedad aumento en los viales de 1,250ml. Aun con lo anterior, el biogás y el metano se mantienen en relación lineal con los otros digestores basándose en SVLL:

$$\text{Biogás} = -286.944 + (300.198 * \text{SVLL}) \quad R = 0.994 \quad R^2 = 0.988 \quad \text{Adj } R^2 = 0.987$$

4.4.2. Análisis estadístico de prueba biológica con plantas de lechuga.

En la Figura 28 se pudo percibir diferencias entre macetas en cuanto al tamaño y cantidad de hojas por lo que se hizo un ANOVA unifactorial para comparar los resultado por cada grupo. En la Tabla 28 se muestran los resultados de cada tratamiento y la comparación entre ellos.

Tabla 28. Desarrollo de plantas de lechuga con distintos tratamientos de fertilización.

Tratamiento	Raíz (cm)		Hojas (n)		Altura (cm)		Peso (g)		Total de semillas geminadas
Digestato	15.00	±1.00	8.50	±0.50	8.75	±0.25	5.28	±0.05	21/30
Composta	13.25	±2.25	9.00	±0.00	12.10	±0.40	10.41	±0.13	17/30
Blanco	12.75	±1.25	8.00	±0.00	10.80	±0.30	7.29	±0.17	11/30
Fertilizante	11.00	±2.18	7.00	±0.58	8.53	±0.93	2.99	±0.42	14/30

Hojas: Número de hojas en la planta. Peso: Peso de las hojas sin raíz en gramos.

Comparación de resultados de ANOVA. Prueba Tukey y Duncan

Raíz ANOVA unifactorial – prueba Duncan - No hubo diferencia significativa.

Hojas ANOVA por rangos- prueba Tukey - Diferencia significativa entre Composta y Fertilizante.

Altura ANOVA unifactorial – prueba Duncan – Diferencia significativa entre todos los casos, excepto Digestato contra Fertilizante que no difieren entre ellos.

Peso ANOVA por rangos – prueba Tukey – No hay diferencia significativa entre ningún caso, excepto Composta contra Fertilizante que difieren entre ellos.

5.- DISCUSIÓN

5.1. Resumen de resultados. El digestato producido por la digestión anaerobia, termófila y seca, en digestores de una fase con capacidad de 125ml y de 1,250ml usando como sustrato la FORSU de la CDMX inoculada con escurrimiento de las pilas de composta madura de la PCBP, previamente incubado a 55°C por 15 días, tiene la calidad suficiente para ser valorado como fertilizante aplicable para nutrición vegetal según la cantidad de N, P y K que este contiene, como lo establece la NADF-020-AMBT-2011.

Dado que no existe normatividad para calidad y uso del digestato, se usaron los parámetros establecidos en la NADF-020-AMBT-2011, ya que, a pesar de ser una norma enfocada a la calidad de composta, se trata de una norma aplicada a FO biodegradada, estabilizada y con la finalidad de ser aprovechada para mejorar el suelo de cultivo. Con lo anterior en mente, se justifica que el digestato es compuesto orgánico estabilizado al cual se busca asignarle la misma finalidad que a la composta, con la diferencia de que uno es el resultado de un proceso aerobio y otro de un proceso anaerobio.

Los resultados mostraron que el pH promedio de digestato es de 8.3. Así mismo se encontró que por cada kg de digestato fresco, hay en promedio 4.7g de NTK, o bien, 5.35% de NTK calculado en base seca, del cual, 71% es de fácil absorción para las plantas ($\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$), de igual forma, calculado en base seca, se encontró que contiene 3.54% de potasio y 0.8% de fósforo. De este último el 18.9% está compuesto por fosfatos que también son de fácil absorción para las plantas. Aparte de dichos macronutrientes, el digestato contiene otros elementos importantes para el desarrollo vegetal como es el caso del calcio, con un 5.42% y 0.83% de magnesio, ambos calculados también en base seca. Cabe destacar que el alto porcentaje de calcio se deba muy probablemente al proceso de preparación del inóculo que ocupó 6g/kg en la FO al momento de ajustar el pH. De este ser el caso, conforme se siga inoculando con el digestato de cada digestión, el nivel de calcio ira disminuyendo hasta llegar a un valor muy cercano al que inicialmente tiene la FO.

Otra característica importante del digestato en este trabajo es que de los SVLL que se encontraban inicialmente en el sustrato, solo quedó el 30% de ellos en el digestato, es decir, se consumió el 70% de los SVLL disponibles en el digestor. De dicho consumo, por cada gramo de SVLL se generó en promedio de todos los casos, 462 mililitros de biogás con del cual, el 60% estaba compuesto de CH_4 . Los niveles de metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Hg y Ti) estuvieron muy por debajo de los requeridos por la norma, así mismo con respecto a los coliformes fecales, salmonella *spp.* y huevos de helminto.

En la prueba de cultivo de lechuga en suelo tratado con digestato líquido al inicio del experimento y por única ocasión, mostró tener el mejor desempeño en germinación de semillas de lechuga. En cuanto al desarrollo de las plantas de lechuga, al igual que el tratamiento fertilizado, obtuvo valores por debajo del blanco negativo.

5.2. Estudios previos. En cuanto a las características físico-químicas del digestato generado en el laboratorio del CIEMAD se encontraron algunas similitudes al compararlas estadísticamente con las reportadas en el digestato de distintos digestores (Tabla 1). En la Figura 29 se muestra una gráfica comparativa de porcentajes de los componentes más importantes del digestato en el tema de nutrición vegetal. Así mismo, cada componente se comparó estadísticamente usando una T-Student entre cada valor donde se pudo apreciar lo siguiente:

1. No hay diferencia significativa entre la cantidad promedio de nitrógeno en base húmeda reportado en la bibliografía y el digestato generado en este trabajo. Salvo en algunos casos que usan residuos animales para generar biogás, el cual puede entenderse por la alta cantidad de proteína en los residuos animales (Drosg et al., 2015). Aunado a esto, la FORSU de la CdMx se caracteriza por tener muy bajo contenido de proteína animal.
2. En cuanto a la cantidad de fósforo, potasio y magnesio, nuestro digestato obtuvo una cantidad estadísticamente más baja que la reportada en la bibliografía.
3. Caso contrario, el calcio fue significativamente mayor en el digestato del CIEMAD contra lo reportado en digestores europeos.

A pesar de que estadísticamente la diferencia fue significativa, no fue una diferencia notablemente amplia salvo el caso del fósforo y el calcio. Lo anterior podría deberse a la composición de la FORSU, rica en calcio (maíz, tortilla, cascara de huevo, etc.) o la salinidad del terreno de donde se tomó la muestra (PCBP, Texcoco) y el bajo nivel de fósforo es probable que se deba a que, al igual que la proteína, la grasa animal es escasa en la composición de la FORSU que es en donde posiblemente podríamos encontrar mayor cantidad de fósforo en la materia orgánica (Tovar, 2014). En la Tabla 29 se muestra la comparación estadística de los valores mencionados.

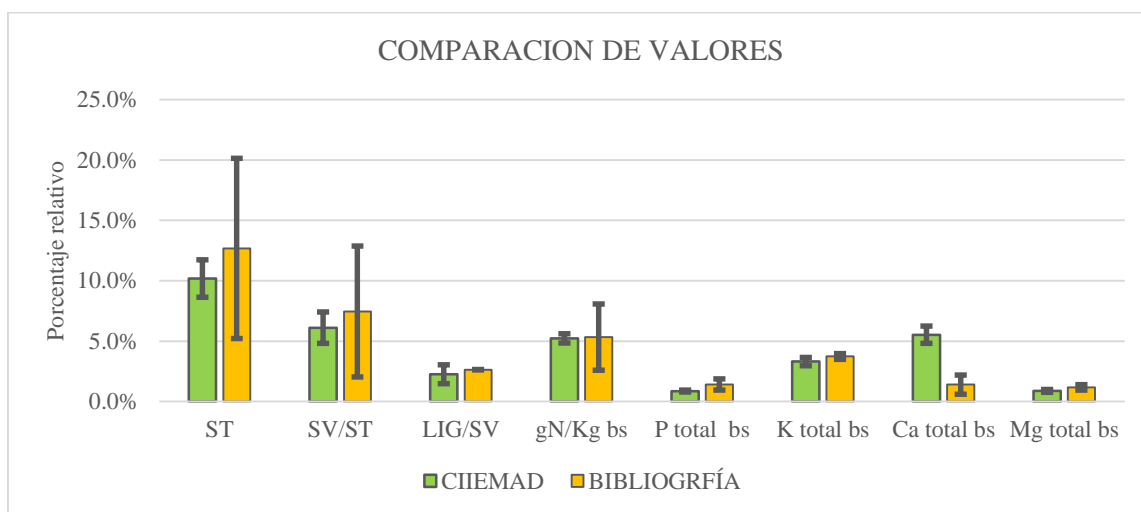


Figura 29. Gráfica comparativa de medias de las características del digestato generado en el CIEMAD y el reportado en la bibliografía.

Tabla 29 Comparación de la media de los parámetros físico-químicos reportados por varios países europeos contra los encontrados en el digestato de este trabajo.

Digestato	ST	HT	pH	SV	Lig/SV	NTK	P	K	Mg	Ca
*Europa	13%	87%	8.06	55%	N/A	4.59	1.37	3.38	0.91	1.4
CIEMAD	9%	91%	8.08	57%	161.61	4.71	0.79	3.19	0.75	4.88
T-Student	P<0.05	P<0.05	P>0.05	P>0.05	N/A	P>0.05	P<0.05	P<0.05	P<0.05	p<0.05

*N=12

El pH del digestato de este trabajo no difiere significativamente del pH reportado en la bibliografía revisada para este trabajo (8.33 y 8.06 respectivamente). Es probable que el ligero incremento se deba a la cantidad de calcio presente en nuestro digestato.

Möller y Müller (2012) explicaron los cambios que la materia orgánica sufre durante la digestión anaerobia y los resultados que el reporta concuerdan con el tipo de compuestos en los que se encuentran los macronutrientes en el digestato y también el cambio de pH en nuestro digestato, demostrando que la mayor parte de los elementos que inicialmente tiene la materia orgánica con la que se alimentó el digestor, permanecen en el digestato. Después de un proceso de óxido-reducción por el metabolismo y respiración los microorganismos anaerobios, los compuestos sufren cambios químicos pero los elementos se mantienen, con la excepción del carbono, hidrógeno y oxígeno, ya que, salen del sistema en forma de biogás.

En cuanto a la toxicidad, el digestato generado en el CIEMAD obtuvo valores por debajo del límite máximo permisible de metales traza, coliformes fecales, *salmonella spp.* y huevos de helminto que establece la NADF-020-AMB-2011 para composta, incluso dichos valores estuvieron por debajo de los límites estipulados en las normas europeas que son más estrictas que la nuestra (Ver Tabla 2). La baja concentración de metales pesados en el digestato generado por la digestión de la FORSU tomada de la PCBP probablemente se deba a una efectiva separación en fuente, así como a una segunda separación por la pepena de la CdMx que acopia y revende todo metal (Tovar, 2014). Por otro lado, tanto la *salmonella spp.*, los coliformes fecales y los huevos de helminto, difícilmente proliferan a 55°C en condiciones anaerobias, por lo que los bajos niveles de estos eran de esperarse.

5.3. Prueba de fitotoxicidad y prueba biológica. La prueba de germinación de semillas de lechuga en macetas con distintos tratamientos para enriquecer el suelo, demostró que el digestato fresco acidificado a pH 6.5 no inhibe la germinación e incluso, obtuvo los valores más altos de germinación con respecto al suelo tratado con composta, suelo fertilizado y suelo sin tratamiento los cuales después del digestato obtuvieron mejores resultados en ese orden. Abdullahi et al. (2008) encontraron que un digestato sin tratamiento alguno y aplicado directamente a la semilla era fitotóxico, sin embargo, si se diluye y se estabiliza por completo el digestato, la germinación se acelera y promueve un mejor desarrollo. Esto probablemente se deba a una mejor capacidad

de retener la humedad a causa de la materia orgánica recalcitrante que se encuentra en el digestato, mejorando así el suelo al que se aplica. Así mismo, Abdullahi et al. (2008) relacionaron la cantidad de amoníaco con la estabilidad del digestato. De acuerdo a nuestros resultados en la prueba de germinación, si bien no se puede asegurar que se trata de un digestato estabilizado y maduro, se sabe que hay baja volatilización de amoníaco, ya que, los niveles altos de este compuesto pueden inhibir o retardar la germinación.

En otro experimento similar, también con lechuga en distintos tratamientos de fertilización, Liu et al. (2014) obtuvieron valores ligeramente menores de desarrollo en plantas tratadas con fertilizante inorgánico ($0.1\text{gNH}_3\text{-}4^+/\text{kg}$ suelo), frente a plantas de lechuga tratadas con fertilizante orgánico (excretas). Estos mismos investigadores explicaron este comportamiento, basándose en la conductividad eléctrica, del suelo después de los tratamientos, pues el suelo tratado con los fertilizantes aumento su CE, aparte, menciona que la temperatura y el tamaño de las macetas pudieron ser un factor importante en el proceso de nitrificación, exceso de nitritos en el suelo o inhibición por amoníaco. Difirió con el primer argumento de Liu et al., ya que, en nuestro caso, la CE de las macetas de blanco negativo no difiere significativamente del caso de digestato ni del de fertilizante. En lo que si estoy de acuerdo es que la maceta fue más chica de lo debido, así como la cantidad de suelo. Otro punto importante que abordan Liu et al (2014) es que la mezcla del suelo con el tratamiento fue intensa y en el caso de este trabajo, se agregó únicamente en la superficie de la maceta.

En el análisis estadístico del resultado de desarrollo de las plantas por tratamiento, se mostraron diversas diferencias significativas entre grupos, de ellas sobresale el hecho de que, tanto en el valor de “Altura” con de “Peso” no existió diferencia significativa entre digestato y fertilizante. Siendo el tratamiento con fertilizante el que obtuvo valores más bajo y fue este el que obtuvo diferencias significativas frente a la composta en 3 de los 4 valores.

En promedio, respecto al Blanco Negativo, aunque haya habido diferencia significativa, el tratamiento con Digestato y el tratamiento con Fertilizante obtuvieron valores más bajos en Altura y Peso. Dichos valores son parámetros de desarrollo, con lo que se puede considerar algún compuesto dentro del tratamiento con fertilizante y el de digestato generaron una fitotoxicidad moderada como lo sugieren Awodun et al (2015) en su diseño experimental en cuanto a la fitotoxicidad.

Como se mencionó anteriormente, niveles altos de amoníaco pueden inhibir el desarrollo de las plantas. La moderada fitotoxicidad del tratamiento con digestato y del tratamiento con fertilizante triple 17 se puede explicar al revisar que el nitrógeno que estos tratamientos se aportan, se encuentra en forma de $\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$ (Urea $\text{R-NH}_2\text{-R} \rightarrow \text{NH}_3$). Al exponer dicho compuesto a la temperatura media del invernadero que fue de 35°C de 11am a 4pm aunado y en un suelo que tuvo un pH de 8.14 y 7.84 respectivamente (al final del experimento), se puede entender que el

equilibrio de amonio amoniaco se inclinó hacia el NH_3 (Abdullahi et al.-2008, WRAP, 2010, PAS-110, 2014), con lo que se puede concluir que hay evidencia suficiente como para explicar la moderada fitotoxicidad a causa de la liberación de cantidades suficientemente altas de amoniaco como para inhibir parcialmente el desarrollo de las plantas. El fertilizante libera de forma más rápida sus nutrientes que el digestato, ya que, los compuestos de este último están dentro de una compleja matriz orgánica. Esto se hace evidente al analizar la diferencia en la prueba de germinación entre el digestato y el fertilizante. Por lo que debe de hacerse un experimento con distintas concentraciones de digesto y hacer mediciones del nitrógeno amoniacal al menos en 3 momentos durante el experimento.

5.4. Implicaciones teóricas y prácticas. Respecto a los resultados obtenidos y tratándolos desde un enfoque de aplicación práctica del digestato, existen organizaciones como la Agencia Internacional de Energía y Bioenergía (IEA Bioenergy por sus siglas en inglés), que ha hecho investigaciones, experimentación, aplicaciones de campo y seguimiento por más de 7 años en torno al uso agrícola y valorización del digestato, muchos trabajos los han desarrollado en conjunto con el Programa de Acción para Residuos y Recursos (WRAP por sus siglas en inglés) con sede en el Reino Unido. En promedio, los resultados que ellos presentan sobre la composición físico-química del digestato generado por digestores que utilizan la FORSU (también mostrados en la Tabla 1) son similares a los que se reportaron en esta investigación. De igual forma, ellos justifican el aprovechamiento del digestato en base a los macronutrientes, N, P, y K, que se encuentran dentro de este (Drosg et al., 2015; WRAP, 2010). Consideran que antes de usar el digestato este debe separarse en una fracción “seca” y una fracción “líquida”, esto planteado desde una perspectiva logística, pues la fracción líquida es más fácil de aplicar al campo directamente con pipas de inyección (lo cual ya hacen) y la fracción sólida puede usarse para composta y después transportarse “fácilmente” en camiones de caja abierta.

Contrario a lo anterior, en este trabajo se encontró que el manejo del digestato más apropiado al momento de usarlo en el experimento para enriquecer el suelo para cultivo de lechuga “italiana” fue; acidificación con ácido sulfúrico para fijar el amonio presente en el digestato (pH de 8.2 a 6.5) y aplicación directa al suelo sin separación de la fracción sólida y líquida. Este pre-tratamiento se ha aplicado al digestato en distintos trabajos con la justificación de que uno de los componentes más importantes para la valoración del digestato es el Nitrógeno de fácil absorción por su valor a nivel de nutrición vegetal (Sheets et al., 2015).

En lo que respecta al nitrógeno, se sabe que en el proceso de separación de las fracciones sólida y líquida sin acidificación, al momento de manipular el digestato para extraerle la fracción líquida por métodos mecánicos, el nitrógeno se volatiliza en forma de amoniaco. Por otro lado, una parte del nitrógeno total del digestato se queda en la fracción sólida, la cual, al momento de usarla para generar composta, perderá parte de ese nitrógeno de nuevo en forma de amoniaco y

otra parte se nitrificará con riesgo a percolarse al suelo. En particular, la pérdida de nitrógeno ha sido un tema abordado por WRAP y IEA, pero aun así recomiendan la separación de fracciones.

Así mismo, analizando la propuesta de separación en fracción sólida y líquida del digestato desde una perspectiva energética y logística, para hacer dicho trabajo se requiere de un gasto energético adicional cualquiera sea el tratamiento de separación del digestato, dicho gasto extra restaría eficiencia en el balance energético de lo generado por el biogás, aunado a esto, acopiar, trasladar y aplicar la fracción líquida y sólida por separado significa aumentar el gasto de diésel y tiempo de trabajo contra lo que se gastaría con un digestato sin separación.

Por lo anterior, para analizar el digestato desde un escenario real de uso, logística y posible precio comercial, se estimó la cantidad equivalente de compuestos fertilizantes comerciales que podrían encontrarse dentro del digestato para así asignar monto estimado por tonelada. Considerando que, en caso de mantenerse relativamente constante ($CV < 20\%$) la cantidad de macro nutrientes y humedad en el digestato de plantas de digestión anaerobia que tratan la FORSU a escala industrial en la CdMx (1000-2000 ton/día) este podría trasladarse a tierras de cultivo aledañas como las que se muestran en la Tabla 8.

En el traslado y entrega, sin considerar renta de equipo (la renta por día de una camioneta con tanque 20,000 litros oscila de \$1,000.00 a \$3,000.00 por día), cada viaje redondo de una pipa con capacidad de transportar 20 toneladas de digestato de la CEDA a las zonas más cercanas con fuerte actividad agrícola alrededor de la CdMx, tendría en promedio un costo de \$150.00 pesos por sueldos y entrega más \$350.00 pesos en consumo de diésel aproximadamente. Dicho consumo equivaldría a la emisión de 57.4 kg de CO_2 a la atmosfera. El recorrido de ida y vuelta sería en promedio de 54 km y tomaría alrededor de 1:45 horas sin considerar tiempo de carga y descarga del digestato.

Según la cantidad de N, P y K en el digestato, reportada en este trabajo, cada 20 toneladas de digestato fresco contendría el siguiente equivalente en compuestos fertilizantes comerciales (precios por tonelada mostrados en la Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6):

- 66kg de Amoníaco Anhidro con un valor estimado de \$436.92
- 9.0kg de Nitrato de calcio con un valor estimado de \$105.74
- 6.5kg de Súper fosfato simple con valor estimado de \$36.50
- 9.5kg de Cloruro de potasio con valor estimado de \$69.75
- 18,400 litros de Agua con valor (precio pipa de agua) \$644.00

Esto más otros compuestos con potencial valor comercial como 500kg de materia orgánica estabilizada rica en lignina y diversos micro-nutrientes como 1.35kg de magnesio o 2kg

de hierro no fueron contemplados. En suma, 20 toneladas de digestato tendrían un costo comercial de \$1,292.00 pesos.

Por ser un compuesto rico en materia orgánica estabilizado proveniente de un proceso de biodegradación natural, es probable que, aunque se igualara la cantidad de compuestos fertilizantes que hay en el digestato, el fertilizante sintético mostraría menor desempeño en el desarrollo de cultivos.

5.5. Limitaciones. Existen aún una serie de retos con el trabajo del digestato. Por una parte, el pH del digestato representa un gran problema en temas de pérdida de nitrógeno así mismo, de no acidificarse puede alcalinizar suelos y con ello inhibir la absorción de algunos nutrientes. Por lo que debe buscarse el mejor método para acidificar que sea económico y eficiente. Aunado a ello, el transporte y aplicación del mismo requiere de pipas y bombas “traga-sólidos” para su aplicación, lo cual complica la operación del mismo.

6.-CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERPECTIVAS FUTURAS

Fue posible aumentar los ST del efluente de las pilas de composta madura de la PCBP después de incubado para generar un inóculo alto en ST el cual que puede ser usado para hacer digestiones anaerobias “secas” sin tener que extraer o eliminar humedad.

Así mismo se pudo conocer por primera vez la presión a la que puede llegar un digestor a escala laboratorio (80psig/1,250ml) y con ello tener un dato importante para calcular (estimar) mejor la cantidad de biogás y así comparar métodos de medición de biogás y con ello seleccionar el más adecuado para este tipo de trabajo que a su vez permita disminuir el margen de error de este valor.

En lo que respecta a nutrición vegetal, el digestato generado por la digestión anaerobia de la FORSU de la CdMx contiene la cantidad suficiente de macronutrientes, micronutrientes y materia orgánica recalcitrante como para ser valorado como biofertilizante, es bajo en metales pesados y sanitariamente seguro de manejar.

Desde el punto de vista económico, el costo de traslado y manejo del digestato a escala industrial es suficientemente bajo como para justificar un análisis más a fondo para la comercialización del digestato que le permita competir en un mercado de fertilizantes para el campo mexicano.

En cuanto al desempeño frente otros fertilizantes y mejoradores de suelo, se encontró que se logra significativamente mayor germinación en un suelo tratado con digestato que en un suelo sin tratamiento o un suelo tratado con fertilizante comercial. En cuanto al desarrollo de la planta,

no hubo diferencias significativas estadísticamente entre blanco negativo, composta y fertilizante comercial, pero se encontraron evidencias cualitativas que sugieren que el digestato acidificado mejora las condiciones para germinación y posteriormente el desarrollo de cultivos, lo cual ha de aclararse en futuras investigaciones.

En el aspecto ambiental es importante recordar que la generación de fertilizantes sintéticos consume una gran cantidad de energía y requiere de la explotación de recursos naturales que a su vez deja un gran impacto ambiental. Por lo que otra ventaja frente a los fertilizantes es que el aprovechamiento del digestato es a su vez el resultado del aprovechamiento de otro residuo, que de ser usado para generar alimento cerraría un círculo de producción sustentable de alimentos. El uso de digestato es una opción económicamente viable y buena una alternativa de nutrición vegetal que pertenece al esquema de cultivo orgánico de bajo impacto ambiental que debe de aprovecharse.

Futuras líneas de investigación

5.1. Inóculo

Es importante saber que tan fácil puede reproducirse este experimento en distintas regiones. Por lo que valdría la pena acopiar y madurar el efluente de una pila grande de composta madura en un área distinta a la que rodea la PCBP para hacer PBM y comprobar que tan único es el inóculo utilizado para la digestión de esta investigación y con ello analizar la posibilidad de poder generar un inóculo de esta naturaleza en cualquier parte de México.

Para la prueba biológica con plantas en maceta- La prueba biológica no mostró resultados contundentes por lo que debe mejorarse el diseño, controlando factores como es el caso de la composición físico química del suelo así como porosidad, retención de humedad y la temperatura. Otro factor importante a controlar en este experimento es la relación con la que se comparara el desempeño del digestato frente a fertilizantes y composta, ya que, en este caso, se usó el NTK como punto de referencia, sin embargo, la composta es rica en nitratos mientras que el digestato es rico en amonio y el fertilizante usualmente contiene nitrógeno en forma de urea. Estas formas de nitrógeno son utilizadas por la planta de distinta forma, de igual manera, el comportamiento en el suelo de estos compuestos es diferente. De usarse de nuevo el nitrógeno como punto de referencia, ha de medirse el NTK en el suelo después de la cosecha, así como el que contengan las plantas y hacer comparación estadística de este. Por último hacer la prueba biológica en macetas más grandes o en campo abierto y con distintas unidades taxonómicas de plantas.

5.2. Acidificación - Otra línea de investigación que sugiero hacer recircular el CO₂ extruido del biogás a través del digestato con la finalidad de acidificarlo por medio de la generación de ácido carbónico hasta obtener un pH neutro o ligeramente ácido, como alternativa al uso de ácido sulfúrico para la acidificación del digestato. Medir la estabilidad del mismo y su desempeño en el campo.

7.- BIBLIOGRAFIA

- 1 Abdullahi, Y., Akunna, J., White, N., Hallett, P., & Wheatley, R. (2008). Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment. *Bioresource Technology*, 99, 8631-8636.
- 2 AEC - Alset Energy Corp. (2016, July 13). Lithium Salars - México | Alset Energy Corp. Recuperado de: <https://alsetenergy.ca/projects/salars>. Consultado 15/02/2017.
- 3 Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *Biogas handbook* Esbjerg. Denmark, October.
- 4 Al Seadi, T., & Lukehurst, C. (2012). Quality management of digestate from biogas plants used as fertilizer. *IEA Bioenergy*, 37, 40.
- 5 Albuquerque, J. A., de la Fuente, C., & Bernal, M. P. (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 160, 15-22.
- 6 ANACOFER – Asociación Nacional de Comerciantes de Fertilizantes, 2014 – Foro nacional Pemex petroquímica, Los fertilizantes y el amoniaco en México.
- 7 Angelidaki, I., Aleves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, L., Guwy, A., & Jenicek, P. (2007). *Anaerobic Biodegradation, Activity and Inhibition (ABAI) Task Group Meeting 9th to 10th October 2006, in Prague*. Recuperado de: <http://orbit.dtu.dk>. Consultado en Octubre 17, 2015,
- 8 Awodun, M. A., Osundare, O.T., Oyelekan, S. A., & Okonji, C. J. (2015). Comparative effects of organic and inorganic soil amendments on the growth of cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) seedlings. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 7, 37-42.
- 9 Banks, C. J., Heaven, S., & Zhang, Y. (2013). Review of the application of the Residual Biogas Potential test. *WRAP*, (110), 18-21. Recuperado de: www.wrap.org.uk Consultado 12/03/16.
- 10 Barrón, S.F.J (2013). *Optimización del proceso de composta producida a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos que se generan en la Ciudad de México*. (Tesis de Maestría). CIEMAD-IPN, México, D.F.
- 11 BCS. (2016, May 2). ¿Por qué no se aprobó Don Diego? *Baja California Sur Noticias* [Puerto Chale], p. Política P1. Recuperado de www.bcsnoticias.mx .Consultado el 05/06/16
- 12 Bhogal, A., Taylor, M., & Nicholson, F. (2016). DC-Agri; field experiments for quality digestate and compost in agriculture. *WRAP*, 1, 10 - 11. Recuperado de: www.wrap.org.uk. Consultado el 12/02/2016.
- 12 Bohn, H. L., Strawn, D. G., O'Connor, G. A., & John Wiley & Sons. (2016). *Soil Chemistry* (2nd ed.). Chichester: Wiley Blackwell. Capítulo 5 *Reacciones Redox en suelo*. P. 113 – 144.

- 13 Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). Nitrogen and sulfur economy on soil. In: *The nature and properties of soils* (9th ed., pp. 285 - 304). Macmillan Publishing Company.
- 14 CEMAGREF - Centre National du Machinisme Agricole. (2011, May 5). *Digestates: Quality and Use* [PDF]. Obtenido de https://www.allacronyms.com/Cemagref/Centre_National_du_Machinisme_Agricole#ixzz4fmCb7729, Consultado el 15/03/2016.
- 15 CGM - Secretaria de Economía - Coordinación General de Minería. (2014). Perfil del mercado de litio. *Dirección General de Desarrollo Minero*, p12. Obtenido de: <http://www.gob.mx/se/>.
- 16 Chatterjee, B., & Mazumder, D. (2016). Anaerobic digestion for the stabilization of the organic fraction of municipal solid waste: A review. *Environmental Reviews*, 24(4), 426-459.
- 17 Dabkowski, B. (2008). Applying Oxidation- Reduction Potential Sensors in Biological Nutrient Removal Systems, Proc. of WEFTEC 2008.
- 18 Dania, S. O., Akpansubi, P., & Eghagara, O. O. (2014). Comparative Effects of Different Fertilizer Sources on the Growth and Nutrient Content of Moringa (Moringa oleifera) Seedling in a Greenhouse Trial. *Advances in Agriculture*, 2014, 1-6.
- 19 De Baere, L., & Mattheeuws, B. (2013). Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe—Status, experience and prospects. *ISTANBUL 3W CONGRESS 2013*, 38.
- 20 De Meester, S., Demeyer, J., Velghe, F., Peene, A., Van Langenhove, H., & Dewulf, J. (2012). The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology. *Bioresource Technology*, 121, 396-403.
- 21 Drog B., Fuchs W, Al Seadi T., Madsen M., Linke B. (2015). Solid–liquid separation –the first step in digestate processing. In *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* (1st ed., pp. 18 - 19). UK: IEA Bioenergy.
- 22 FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). *World fertilizer trends and outlook to 2018*. Rome: Food & Agriculture Organization of United Nations.
- 23 FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). FAOSTAT - México - Import- Export- Production- 2014. Recuperado de: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/RF> Consultado el 02/02/2017.
- 24 FICEDA - Fideicomiso para la Construcción y Operación de la Central de Abastos de la Ciudad de México. (2016, June 20). XLI Reunión Ordinaria del Comité Técnico y de Distribución de Fondos.
- 25 Forster-Carneiro, T., Pérez, M., Romero, L., & Sales, D. (2007). Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: Focusing on the inoculum sources. *Bioresource Technology*, 98(17), 3195-3203.

- 26 FT - Freightliner Trucks - Aerodinámica. (2014, July). Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/84756/4frrighliner.pdf>. Presentación 2015 Ing. Marco Martínez, Daimler Vehículos Comerciales México. Consultado el 02/04/2017.
- 27 GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL 15 de Octubre de 2014 Acuerdo Por El Que Se Aprueba El Programa Sectorial Ambiental Y De Sustentabilidad 2013-2018.
- 28 Gállego Bravo, A. K. (2017). *Caracterización microbiológica del escurrimiento proveniente de la planta de Composta de Bordo Poniente* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- 29 Gooch, C.A. and D.L. Ludington. 2005. Anaerobic Digestion Performance Goals: Effect on System Components and Costs. Proceedings from the Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations conference. NRAES-176. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service. Cornell University, Ithaca, New York
- 30 Google – GoogleMaps INEGI (2017). Datos de mapa “Como llegar”. Consultado en <https://maps.google.com.mx/>
- 31 Harada Y. & Inoko A. (1975) Cation-exchange properties of soil organic matter, *Soil Science and Plant Nutrition*, 21:4, 361-369.
- 32 Howarth, R. W. (2008). "Coastal nitrogen pollution: a review of sources and trends globally and regionally". *Harmful Algae*. 8: 14–20.
- 33 Huldrych, E. (2008). *Buchi Kjeldahl Guide* [Kjeldahl Guide Buchi 2008] (1st Ed.). Recuperado de: <http://www.buchi.com/en/products/kjeldahl-dumas/distillation-unit-k-350-k-355>
- 34 INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM). Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/establecimientos/secundario/emim/> Consultado el 15/01/2017.
- 35 Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744.
- 36 Karthikeyan, O. P., & Visvanathan, C. (2013). Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(3), 257-284.
- 37 Kothari R., Pandey A.K., Kumar S., Tyagi V.V., Tyagi S.K. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 174–195.
- 38 Liu, C., Sung, Y., Chen, B., & Lai, H. (2014). Effects of Nitrogen Fertilizers on the Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(4), 4427-4440.

- 39 Lu, F. (2014). Chapter 14 - Lignin control on soils ecosystem services: Implication for biotechnology advances in biofuels crops. In *Lignin: Structural analysis, applications in biomaterials and ecological significance* (2nd ed., pp. 376 - 402). New York, NY: Nova Science Publishers, Inc.
- 40 Ludington, D. (2013). *Calculating the Heating Value of Biogas* [PDF]. Recuperado de: http://masters.donntu.org/2013/fkita/alexandrova/library/Heating_Value_of_Biogas_copy.pdf Consultado el 01/05/2017.
- 41 Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.
- 42 Masley, S. (2012, December 8). Growing Spinach, How to Grow Spinach, Planting Spinach. Información adquirida de <http://www.grow-it-organically.com/growing-spinach.html>, consultado el 08/01/2017.
- 43 Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., & Braccio, G. (2013). Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, 103, 1003-1009.
- 44 Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), p242-257.
- 45 Möller, K. (2016). Assesment of Alternative Phosphorus Fertilizers for Organic Farming: Compost and Digestates from Urban Organic Wastes. *Institute of Crop Science University of Hohenheim*, 1, 5-7. Recuperado de <http://improve-p.uni-hohenheim.de/>. Consultado el 15/12/2016.
- 46 Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboukhas, A., Barakat, A., & Carrère, H. (2015). New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy Environ. Sci*, 8(9), 2600-2621.
- 47 Monson, K. D., Esteves, S. R., Guwy, A. J., & Dinsdale, R. M. (2007). Anaerobic digestion of biodegradable municipal waste - a review. *Sustainable Environment Research Centre*, 1(1).
- 48 Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 473-492.
- 49 Pantelopoulos, A., Magid, J., & Jensen, L. S. (2016). Thermal drying of the solid fraction from biogas digestate: Effects of acidification, temperature and ventilation on nitrogen content. *Waste Management*, 48, 218-226.
- 50 PAS 110:2014 Specification for whole digestate, separated liquor and separated fiber derived from the anaerobic digestion of source-segregated biodegradable materia.
- 51 PCM - PACIFIC COAST MINERALS S.A. de C.V. Noticias y Comunicados. (2010, January). Huge Lithium, Potash Deposit Found in México. Recuperado de <http://www.pacificcoastminerals.com/spanish/newspressrelease.html>. Consultado el 15/02/2017.

- 52 Pemex - Petróleos Mexicanos. (2017). Fertilizantes. Recuperado de: <http://www.pemex.com/nuestro-negocio/Paginas/fertilizantes.aspx>. Consultado el 05/02/2017.
- 53 Pemex - Petróleos Mexicanos. (2016, abril). Informe anual 2015. Recuperado de www.pemex.com. Consultado 04/02/17.
- 54 Raposo, F., De la Rubia, M., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(2011), 861–877.
- 55 Ramsay, I. R., & Pullammanappallil, P. C. (2001). Protein degradation during anaerobic wastewater treatment: derivation of stoichiometry. *Biodegradation*, *12*(4), 247-256.
- 56 Raven, R., & Gregersen, K. (2007). Biogas plants in Denmark: successes and setbacks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*(1), 116-132.
- 57 Risberg, K., Pell, M., 2012. Biogas residues as fertilizers – effects on wheat growth and soil microbial activities. *Appl. Energy* *99*, 126–134.
- 58 Rittman, B., and McCarty, P. *Environmental Biotechnology: Principals and Applications*. New York, NY: McGraw-Hill, 2001.
- 59 S.E. - Secretaría de Economía, (2017). SNIIM - Sistema Nacional de Información de Mercados. Secretaría de Economía Precios de Frutas, Hortalizas, Vegetales, Carnes, Pescados, Pecuarios, Pesqueros. Recuperado de: <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?opcion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaInsumos.aspx?SubOpcion=9|0>. Consultado el 11/02/2017.
- 60 Sadzawka R., A., M.A. Carrasco R., R. Grez Z. y M.L. Mora G. 2005. Métodos de análisis de compost. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas N° 30, Santiago, Chile, p. 142.
- 61 SAGARPA - Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). Catálogos - Cultivos de tu municipio 2015. Recuperad de: <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/Catalogos.aspx>. Consultado el 19/02/2017.
- 62 Sárdi, K. (2015). *Methodology of greenhouse experiments, MITSCHERLICH methodology* [presentación en PDF]. Recuperado de: http://www.georgikon.hu/tanszekek/ppss/hu/component/docman/doc_download/135-lecture-5-research-methodology. Consultado el 03/06/2017.
- 63 SGM - Servicio Geológico Mexicano. (2016). *Anuario estadístico de la minería mexicana, 2015* (45th ed.). Ciudad de México, México: Coordinación General de Minería.
- 64 Sheets, J. P., Yang, L., Ge, X., Wang, Z., & Li, Y. (2015). Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. *Waste Management*, *44*, 94-115.

- 65 SMA - Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2015). Inventario de Residuos Sólidos CD MX. 07/11/2016, de SMACdMx Sitio web: <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/programas/residuos-solidos/inventario-residuos-solidos-2014/IRS-2014.pdf> p.34. Consultado el 16/01/2017
- 66 SRPMA - Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente. (2014). Tipología de productores agropecuarios para la orientación de políticas públicas: Aproximación a partir de un estudio de caso en la región Texcoco, Estado de México, México. *DRCP Campus Montecillo*, 14(28), 60-66.
- 67 TAPPI-Professional organization dedicated to the pulp and paper industries. (2006). Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. *T 222 om-02*, 2-14.
- 68 Thenkabail et al., 2013 Landsat 8 -The best hyperspectral narrowbands to study vegetation, agriculture in particular, is in the 400-2500 nm spectral range. Recuperado de: <https://eros.usgs.gov/doi-remote-sensing-activities/2012/usgs>. Consultado el 07/03/2016
- 69 Tovar, L. R., & Gutiérrez, M. E. (2012). *Viabilidad de la capacidad del área actual de la planta de composta, así como su capacidad de operación y la viabilidad de la inclusión del área de la planta de selección a la planta de composta*. Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional.
- 70 Tovar Gálvez, L., & Gutiérrez, M. (2014). Evaluación del programa de separación 2011 - 2014. In *Estudio de factibilidad para producir energía verde mediante digestión anaerobia al procesar aproximadamente 3,000 ton/día de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal. Comparación de tecnologías* (1st ed., pp. 102-104). Ciudad de México: IPN.
- 71 Tripepi, R. R. (2014). What Is Your Substrate Trying to Tell You part I and II. *Plant Science Division, University of Idaho*, 1(1), 7.
- 72 Urbini, G., & Raboni, M. (2014). Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 9(2).
- 73 Vaneckhaute, C., Lebuf, V., Michels, E., Belia, E., Vanrolleghem, P. A., Tack, F. M., & Meers, E. (2017). Nutrient Recovery from Digestate: Systematic Technology Review and Product Classification. *Waste and Biomass Valorization*, 8(1), 21-40.
- 74 Venkiteswaran, K., Bocher, B., Maki, J., & Zitomer, D. (2015). Relating anaerobic digestion microbial community and process function. *Microbiology insights*, 8 (Suppl 2), 37.
- 75 Wilkie, A. C. (2005). Anaerobic digestion: biology and benefits. *Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations*, 63-72.
- 76 WRAP. (12 February 2010). Specification for whole digestate, separated liquor and separated fibre derived from the anaerobic digestion of source-segregated biodegradable materials. En *PAS 110:2010(4 - 46)*.

- 77 Yamane, T., & Joskow, J. (1965). Statistics, an Introductory Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 60(310), 678.
- 78 Zamanzadeh, M., Hagen, L. H., Svensson, K., Linjordet, R., & Horn, S. J. (2016). Anaerobic digestion of food waste – Effect of recirculation and temperature on performance and microbiology. *Water Research*, 96, 246-254.

ANEXO A: PRODUCTO DE INVESTIGACIÓN DERIVADO DEL TRABAJO



El Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo

Otorga la presente

CONSTANCIA

a

Daniel Alejandro Salcedo Serrano

Por haber participado como ponente con el tema:

“Valoración del digestato generado a partir de la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México” en el taller Ruta Poli- Incúbate 2016, que se llevó a cabo el 10 de marzo de 2016.

Atentamente
“La Técnica al Servicio de la Patria”

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN
PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIEMAD

Dra. Laura Arreola Mendoza
Directora Interna del CIEMAD-IPN



<http://www.ipn.mx>



ANEXO B: PRODUCTO DE INVESTIGACIÓN DERIVADO DEL TRABAJO



El Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo



otorga la presente

CONSTANCIA

a

Daniel Alejandro Salcedo Serrano

Por su participación como ponente con el tema "VALORACIÓN DEL DIGESTATO GENERADO POR LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO" en el "5º Coloquio de Estudiantes del CIEMAD-IPN" que se llevó a cabo el día 18 de noviembre de 2016 con sede en la Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología "Víctor Bravo Ahuja" del Instituto Politécnico Nacional.

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Dr. Víctor Florencio Santes Hernández
Director del CIEMAD-IPN



www.gob.mx/IPN

www.ipn.mx



Memorias disponibles www.ciemad.ipn.mx/ sección 5to coloquio.