



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**REVISIÓN Y PROPUESTA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA PLANTA PILOTO
DE BIODIGESTIÓN (MBIO) DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DEL CENTRO
DE ACOPIO Y COMERCIALIZACIÓN DE NOPAL-VERDURA (CANV)**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Santiago Martínez Sosa



C.D.M.X.

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **PROFESOR: ALFONSO DURAN MORENO**
VOCAL: **PROFESOR: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO**
SECRETARIO: **QUÍMICA: NELLY PAOLA MEJÍA RODRÍGUEZ**
1ER. SUPLENTE: **PROFESOR: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS**
2° SUPLENTE: **PROFESOR: DAVID FRAGOSO OSORIO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: SUSTENTABILIDAD ENERGÍA Y
MEDIO AMBIENTE S.A. DE C.V. (SUEMA)**

ASESOR DEL TEMA: NELLY PAOLA MEJÍA RODRÍGUEZ

SUSTENTANTE: SANTIAGO MARTÍNEZ SOSA

Contenido

1. Resumen	6
2. Antecedentes.....	8
3. Introducción	19
4. Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos.....	20
5. Objetivos.....	30
5.1. General	30
5.2. Particulares	30
6. Marco teórico.....	31
6.1. El nopal como biomasa	31
6.2. Diagrama de flujo de proceso	34
6.3. Marco normativo de la planta MBio.....	38
6.4. Proceso y evolución de la planta MBio.....	39
7. Propuesta para llevar a equilibrio el proceso.....	54
7.1. Abasto controlado de residuos.....	55
7.2. Seguimiento del proceso.....	57
7.3. Metodología experimental.....	57
7.3.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH).....	58
7.3.2. Determinación del parámetro alfa (α)	59
7.3.3. Determinación de sólidos	60
7.3.4. Medición de los componentes del biogás	61
8. Resultados.....	62
8.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)	62
8.2. Determinación del parámetro alfa (α).....	64
8.3. Determinación de sólidos	66
8.4. Medición de componentes del biogás	68

8.5. Producción estimada de biogás	70
9. Análisis de resultados	73
10. Conclusiones	74
11. Recomendaciones.....	75
12. Anexos	76
13. Bibliografía.....	80

Índice de figuras

Figura 1 Disposición y recuperación de residuos sólidos urbanos.....	14
Figura 2 Diagrama de flujo de tratamiento de residuos sólidos urbanos.....	17
Figura 3 Clasificación de los procesos de tratamiento	24
Figura 4 Esquema de la planta MBio	31
Figura 5 Sistema diseñado para la alimentación de solución buffer.....	35
Figura 6 Condensadores de humedad del biogás.....	36
Figura 7 Colectores solares para calentamiento de agua	36
Figura 8 Equipos no necesarios para el tratamiento de lodos.....	37
Figura 9 Corrientes de proceso corregidas	37
Figura 10 Esquema del sistema de degradación anaerobio	41
Figura 11 Propuesta de calendario informativo para el abasto de RO	56
Figura 12 Entrada del CANV donde se presentaría el calendario	56
Figura 13 Equipo para la medición del pH	58
Figura 14 A) Calibración del equipo de medición de pH B) Medición del parámetro alfa de los lodos de digestión	59
Figura 15 A) Toma de muestras B) Calentamiento C) Incinerado D) Pesado.....	61
Figura 16 Medición de los componentes del biogás.....	61
Figura 17 Rotámetro instalado en la planta.....	70

Índice de gráficas

Gráfica 1 Alimentación de la planta con respecto al tiempo de operación	45
Gráfica 2 Tendencia de la temperatura de operación con respecto al tiempo	47
Gráfica 3 Tendencia del pH con respecto al tiempo	49
Gráfica 4 Composición del biogás con respecto al tiempo	51
Gráfica 5 Ácidos grasos volátiles presentes en el proceso.	53
Gráfica 6 Comportamiento del ph con respecto al tiempo.....	63
Gráfica 7 Seguimiento de alfa con respecto al tiempo	65
Gráfica 8 Sólidos en el Digestato con Respecto al Tiempo.....	67
Gráfica 9 Composición del biogás a lo largo del tiempo.....	69
Gráfica 10 Generación de biogás a lo largo del tiempo.....	72

1. Resumen

Existe una tendencia mundial para migrar de procesos de generación de energía tradicionales a métodos de generación sustentables y amigables con el ambiente. Uno de estos nuevos procesos de generación de energía, es el que aprovecha la biodigestión anaerobia de biomasa. Existen diversas fuentes de biomasa, sin embargo, una de las fuentes más interesantes es la fracción orgánica de los *Residuos Sólidos Urbanos* (RSU). En la digestión anaerobia, los residuos son digeridos en un ambiente libre de oxígeno por la acción de microorganismos. El subproducto más importante en esta digestión es el biogás que puede usarse para la generación de energía. En este proyecto se realizó el análisis y seguimiento de una planta piloto de digestión anaerobia (MBio) la cual se encuentra en la alcaldía de Milpa Alta. La planta fue diseñada para el tratamiento de los residuos orgánicos de un mercado de abasto popular de la Ciudad de México.

El objetivo fue llevar la planta piloto hasta su funcionamiento óptimo y a la vez, servir como laboratorio semi-industrial y ejemplo de innovación en los procesos de tratamiento de RSU disponibles en la Ciudad de México. El digester MBio, comenzó a operar en abril del 2017, pasando por un proceso de arranque y un proceso de estabilización que inició en el mes de marzo del 2018. La alimentación inicial de la planta fue de 106 kg de residuos, considerando la disponibilidad de residuos orgánicos que se tenían en ese momento, pero procurando mantener un suministro constante que aumentara de manera escalonada, para prevenir problemas tales como la acidificación del sistema, que aparecieron durante su puesta en operación inicial. El digester alcanzó la estabilidad química después de 70 días de operación, llegando a una composición de biogás de 70% vol. de CH₄ y 29% vol. de CO₂, con una reducción de los Sólidos Totales Volátiles (STV) del 74.89% en la alimentación a un 48.61% en el digestato, indicio de una buena digestión. La propuesta de alimentación se vio superada por la digestión llegando al punto en el que los microorganismos en el sistema no contaban con suficiente alimento para digerir, lo cual fue parcialmente solucionado aumentando el suministro.

Sin embargo, la alimentación al sistema puede aumentarse sin riesgo de problemas en sus variables de diseño, siempre y cuando se hagan los análisis fisicoquímicos pertinentes para mantener un correcto control del proceso. Finalmente, para lograr una alimentación óptima del sistema, es indispensable disponer de un mejor sistema de entrega/recepción de los residuos orgánicos con los productores de nopal, a fin de mantener un suministro constante durante la operación del equipo.

2. Antecedentes

Se define como residuo, a todo aquel material o producto desechado y que puede o no ser susceptible de ser valorizado o requiere de cierta disposición conforme a lo establecido en la ley (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, 2003).

La fracción orgánica de los residuos sólidos depende directamente de los ciclos de vida de los seres vivos: son generados desde el momento en que los animales hacen uso de los recursos naturales. En un principio, no representaban un problema para el ambiente o los seres vivos, ya que el área donde se dispersaban y reincorporaban los desechos era comparativamente más grande a la de la población. Conforme el ser humano se adaptó a diferentes hábitats, se extendió y el área fue disminuyendo gradualmente y, en consecuencia, los residuos comenzaron a representar un problema. Posteriormente, el desarrollo tecnológico alcanzado en la revolución industrial (alrededor de 1760) indujo el aumento y concentración de la población en las ciudades. De esta forma, la acumulación de los residuos sólidos aumentó también. Este incremento salió de control y trajo consigo consecuencias negativas tales como el aumento en la contaminación de agua, aire y suelos; la falta de sanidad, así como la propagación de enfermedades. Se han identificado al menos veintidós enfermedades ligadas al mal manejo de los desechos sólidos, debido a la proliferación de *vectores sanitarios*¹.

La salud humana no es la única afectada por el mal manejo de residuos; el ambiente también es impactado negativamente, por ejemplo, por las emisiones de gases como el dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), causantes principales del efecto invernadero a nivel global. El efecto invernadero es el proceso natural a través del cual la atmósfera de la Tierra regula su temperatura. A pesar de ser un fenómeno que ocurre de forma natural; en los últimos 150 años se ha registrado un incremento consistente que, ha sido asociado al incremento en las emisiones de CO₂ de origen antropogénico. El segundo gas en la lista de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provocadas por actividades humanas es el metano (CH₄), que además, es considerado como un gas de efecto invernadero potente debido a que

¹ Vectores sanitarios: organismos que transmiten enfermedades de una persona o animal infectado a otra.

es 23 veces más eficiente que el CO₂ para retener el calor dentro de la atmósfera terrestre (Markets, 2008). Además del CH₄ y CO₂, otros gases de origen antropogénico que contribuyen al efecto invernadero son el óxido nitroso (N₂O), el ozono (O₃), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y los clorofluoroalcanos, principalmente.

Según datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) del 2015 (Ramírez Hernández, 2015), el 7 % de los gases de efecto invernadero emitidos en la Ciudad de México provienen del manejo de residuos urbanos. Dentro de este porcentaje, el 21% corresponde a gas metano. Esto se debe a que, una vez que los residuos orgánicos son depositados en tiraderos a cielo abierto o en rellenos sanitarios, son biodegradados con la emisión de diversos gases producto de la descomposición, entre los que se encuentra el metano.

Entre los años 1980 y el 2016, el aumento en la concentración de metano en la atmósfera se incrementó de 1600 partes por billón (ppb) hasta más de 1850 ppb (Organización Meteorológica Mundial, 2013). Lo cual resulta alarmante, ya que, si estas emisiones no son reducidas, la Tierra podría experimentar cambios drásticos tanto en el clima como en el calentamiento atmosférico.

El problema de los residuos urbanos continúa creciendo en todo el mundo; México no es la excepción, tan solo entre 2003 y 2015, la cantidad de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) aumento un 61.2% alcanzando 53.1 millones de toneladas anuales con un promedio de 1.2 kg diarios por habitante (Moreno et al., 2012). La clasificación de los residuos generados en la ciudad se presenta en la Tabla 1. Esta problemática concierne a todos, desde las acciones de los generadores de residuos para reducir el problema hasta los gobiernos y sus órganos administrativos encargados de establecer las regulaciones ambientales.

En nuestro país el tratamiento de residuos está regulado por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) “NOM-052-SEMARNAT-2005”(NOM-052, 2005), que establece las características de los residuos y su peligrosidad al ambiente. La “NOM-083-SEMARNAT” (NOM-083, 2003), que especifica los criterios de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y de manejo especial. Así como la “NOM-098-SEMARNAT-2002” (NOM-098, 2004), que establece las

especificaciones de operación y límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones de incineración de residuos.

Estas NOM en conjunto con otras normas oficiales específicas, regulan el manejo de residuos sólidos en México. Sin embargo, la concientización de las personas con respecto a la crisis ecológica actual ha influido sobre la forma en la que se manejan los RSU. La percepción de los RSU como “basura” ha cambiado y actualmente son considerados recursos aprovechables: como material reciclable al terminar su *vida útil*² o como materia prima para otros procesos. (Secretaría del Medio Ambiente, 2016).

Aunque la composición de los RSU es compleja e incluye materiales poliméricos reciclables y no reciclables; residuos orgánicos, inorgánicos, etc. Al separar e identificar los componentes de los RSU, es posible encontrar procesos que faciliten el tratamiento de cada fracción. Por ejemplo, los residuos generados en la Ciudad de México (CDMX) según la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013, cuenta con las siguientes características:

Tabla 1 Composición de los RSU en la CDMX

Clasificación de residuo de la NADF-024-AMBT-2013	Porcentaje que representa
Residuos biodegradables susceptibles de ser aprovechados	46.95
Residuos inorgánicos con potencial de reciclaje	25.89
Residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado	26.94
Residuos de manejo especial y voluminoso	0.21
Residuos peligrosos provenientes de fuentes distintas a los establecimientos comerciales, industriales o de servicios.	0

Fuente: Estudios realizados por la UNAM, la UAM y el IPN para el Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal en 2009

Al hacer un tratamiento integral de los residuos, se privilegia la generación de nuevos recursos, por encima de su disposición en rellenos sanitarios. Estos cambios reducen los riesgos a la salud de la población, así como el deterioro ambiental. En la Ciudad de México existen diferentes tratamientos para los RSU (Tabla 2).

² Vida útil: Duración estimada de un objeto para cumplir correctamente la función para la que fue creado.

Tabla 2 Clasificación de métodos de tratamiento de residuos en la CDMX

Tipo de proceso que involucra		Propósito del tratamiento
Procesos Físicos	Separación (manual o mecanizada) Trituración Separación magnética Compactación	Separación (manual o mecanizada) Reciclaje Vitrificación Composteo Pirolisis
Procesos químicos	Hidrólisis Oxidación Vitrificación Polimerización	Recuperación de energía Digestión Anaerobia Incineración Pirolisis
Procesos biológicos	Composteo Digestión Anaerobia	Destrucción de Agentes Infecciosos Incineración Microondas Esterilización
Procesos de Destrucción Térmica	Incineración Pirolisis Esterilización Microondas	

Fuente: Capítulo 1 "Sistemas de Tratamiento de Residuos Sólidos" del informe sobre Residuos Sólidos de SEDESOL

A continuación, se describen los procedimientos de la Tabla 2

- Separación: método en el que los Residuos Sólidos Urbanos y de manejo especial son clasificados según sus características particulares para tener un mejor manejo de éstos (NADF-024, 2015).
- Trituración: proceso a través del que se reduce el tamaño de los residuos para así facilitar su transporte y almacenamiento o como pretratamiento de otros procesos para mejorar su eficiencia (SEMARNAT, 2016).
- Compactación: sistema que permite el aprovechamiento del área donde se vayan a depositar residuos haciendo más eficiente el uso de espacio (SEMARNAT, 2016).

- Hidrólisis: proceso que implica la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (Corrales et al., 2015).
- Oxidación: sistema basado en reacciones de oxidación para romper enlaces de la materia ya sea orgánica o inorgánica. Son necesarias condiciones altas tanto de presión como temperatura (Golomeova S et al., 2013).
- Vitrificación: este proceso consta de un tratamiento térmico de los residuos mezclados con sílice, óxido de sodio y óxido de calcio; para formar productos que se funden a temperaturas altas de entre 1300 y 1500 °C y así obtener un producto vítreo y moldeable (Bellesteros et al., 2010).
- Polimerización: la polimerización es un tratamiento específico para reutilizar monómeros y polímeros presentes en los RSU haciéndolas reaccionar con un catalizador para así tener una regeneración de materias primas (Department of Ecology, 2014).
- Composteo: consiste en la degradación de los desechos orgánicos sucesiva por medio de organismos aerobios. El proceso es muy susceptible a cambios ya que las bacterias necesitan condiciones específicas de temperatura, humedad, cantidad de aire, pH y espacio para lograr un correcto crecimiento de los microorganismos (Golomeova S et al., 2013)
- Digestión anaerobia: es un tipo de fermentación en ausencia de oxígeno catalizada por bacterias y llevando a la producción de lodos y biogás compuesto principalmente de CH₄ y CO₂. Se divide en cuatro fases en el proceso: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Este método es aprovechado para la obtención de energías alternativas como lo es el biogás (Corrales et al., 2015).
- Incineración: este método consiste en quemar los residuos para recuperar energía por medio de vapor. Este método también genera contaminantes atmosféricos por los gases que son libertados al ambiente por lo que es necesario agregar al proceso sistemas de filtración y de reducción de emisiones contaminantes (Golomeova S et al., 2013)
- Pirolisis: consiste en la descomposición térmica de los residuos en ausencia de aire, transformando los residuos en hidrocarburos limpios y carbón. Este proceso sólo puede tratar cierto tipo de residuos como llantas, aceites y

materiales combustibles contaminados con aceite (Golomeova S et al., 2013).

- Esterilización: proceso utilizado para la desinfección de los residuos a través de corrientes térmicas (Elías, 2016).
- Microondas: al igual que la esterilización, el proceso de microondas se utiliza para la desinfección de residuos biológico-infecciosos. Estos son triturados y expuestos a microondas para que su temperatura aumente hasta los 95 ° C (Elías, 2016).

En las grandes ciudades, megalópolis o mega ciudades, como la Ciudad de México, el reto de tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos es mayúsculo. Los métodos de tratamiento no solamente dependen de las características de los residuos, también influyen los factores socio-económicos prevalecientes en la ciudad, Figura 1. Mientras que en los países en desarrollo se invierte más en los procesos de recolección, los países desarrollados invierten en la disposición y tratamiento de los residuos. Cualquier propuesta de solución al problema de los RSU debe tomar en cuenta ambos aspectos.

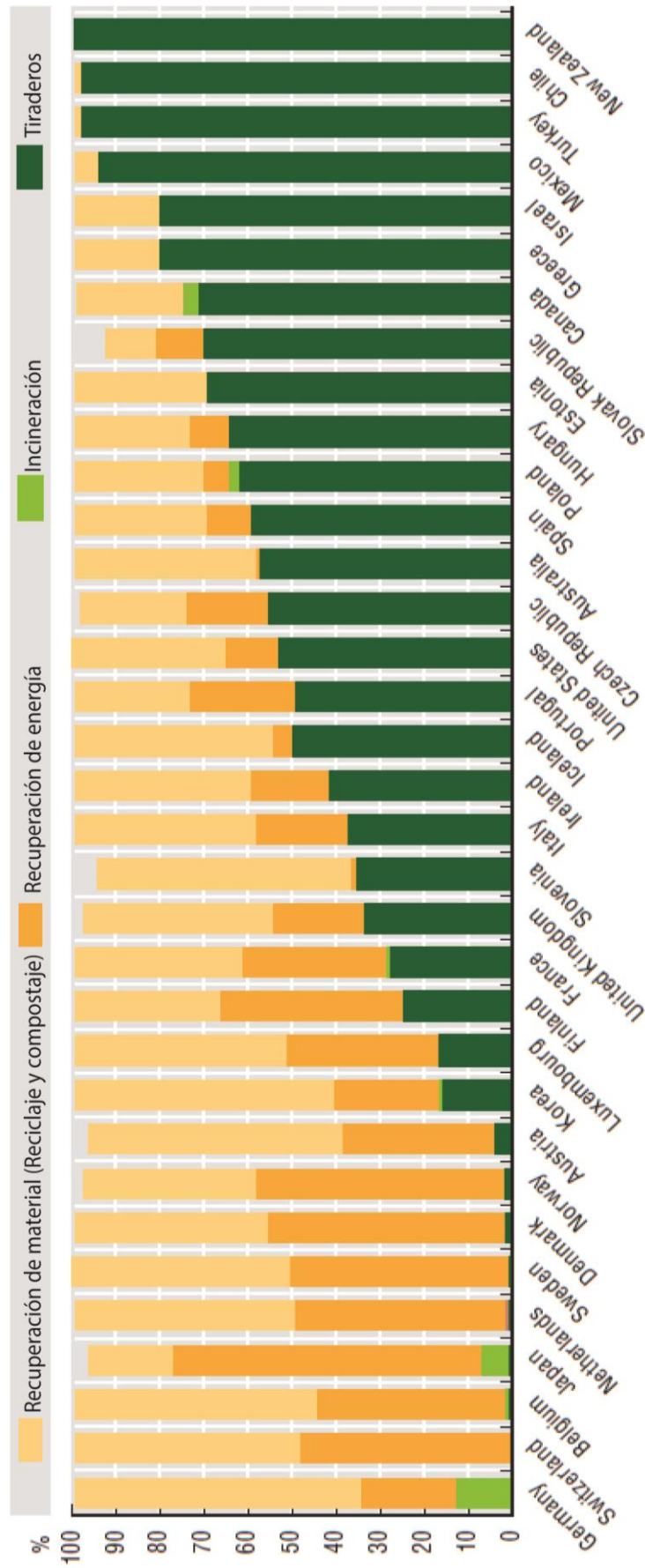


Figura 1 Disposici3n y recuperaci3n de residuos s3lidos urbanos.

Fuente: OECD (2015) "Municipal waste", OECD Environment Statistics (Database).

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), ha habido grandes avances en materia de reciclaje y métodos de tratamiento de residuos a nivel global. Por ejemplo, tan solo en el año 2007, se alcanzó un promedio mundial de 68% de reciclaje para latas de acero, que redujo la emisión de aproximadamente 13 millones de toneladas métricas de CO₂ al ambiente (OECD, 2015).

Otra área del tratamiento de residuos que crece día a día es la generación de energía con residuos tanto de origen orgánico como inorgánico. Particularmente en los países europeos, donde las políticas públicas han promovido la creación de infraestructura para esta industria.

Un ejemplo de la planeación en el tratamiento de residuos es el de la ciudad de Matale en Sri Lanka en la que el gobierno buscó una solución al problema de la saturación del relleno sanitario de la ciudad. Con el apoyo de una organización no gubernamental (ONG) denominada SEVANATHA, se propuso la creación de un centro de reciclaje y composteo, además de un programa educativo para la producción de composta casera. Al principio, pareció fracasar debido a que los habitantes no continuaron con la separación de residuos, prefiriendo el uso del saturado tiradero a cielo abierto. Sin embargo, SEVANATHA diseñó un nuevo programa a través del cual logró cambiar la percepción de residuos como basura para que fueran considerados recursos. También se construyó una planta de compostaje de mayor capacidad y se mejoraron las condiciones de trabajo de quienes recolectaban los residuos.

Estas acciones lograron mejorar el tratamiento de los residuos urbanos y para el 2009 el programa de SEVANATHA fue ampliado para incluir más plantas de compostaje, más procesadores de materiales reciclables, así como biodigestores para el aprovechamiento íntegro de los residuos generados.

En la Ciudad de México, a partir del año 2004 se estableció el primer Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos para el Distrito Federal (PGIRS) 2004-2008, siendo el primer proyecto donde se contemplaba una gestión planeada de los residuos, separando la basura en orgánicos e inorgánicos e incluyendo la implementación de algunos de los métodos de tratamiento antes mencionados. este

Este programa fue posteriormente revisado y actualizado al Programa de Gestión de Residuos Sólidos 2016-2020, que contempla muchos de los procesos físicos mencionados en la Tabla 2, en forma conjunta o como parte de otros procesos químicos y/o biológicos de tratamiento. (Secretaría del Medio Ambiente, 2016).

El primer tratamiento de residuos que se aplica en la Ciudad de México es la separación *en el origen*, a través del cual se espera que la población realice una primera separación de sus residuos y designando días específicos para la recolección de cada tipo de residuo. Luego de la recolección y transporte, los residuos pre separados son llevados a estaciones de transferencia en las que se realiza una separación más específica de los residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado. Finalmente, los residuos se transportan a las plantas de selección (Tabla 3) y aprovechamiento de residuos sólidos para la clasificación de los subproductos reciclables restantes.

Tabla 3 Plantas de selección de la CDMX

Planta San Juan de Aragón módulo I y II	Con un área de 24,000 m ² y un promedio de 19 horas de trabajo diario en promedio.
Planta de San Juan de Aragón Fase II	Con un área de 8,726 m ² y un promedio de 19 horas de trabajo diario en promedio.
Planta Santa Catarina	Con un área de 35,000 m ² y un promedio de 12 horas de trabajo diario en promedio.

Fuente: Elaboración propia con base en la información del Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2017 (IRS)

Estas plantas reciben residuos tanto de camiones recolectores, como de los trabajadores que recolectan la basura de la ciudad y Área Metropolitana. De todos los residuos recibidos y separados se recuperan 163 toneladas de un total de 3,858 toneladas diarias, lo que representa un promedio del 4.22 % del total de residuos. El 95.78% restante es enviado a disposición final en rellenos sanitarios acondicionados para la recepción de RSU (Amieva Gálvez et al., 2018).

En el año 2011 se dio a conocer el cierre de las operaciones de la IV etapa del Relleno Sanitario de Bordo Poniente lo cual hizo necesario ampliar tanto las instalaciones como la capacidad de la Planta de Composta de Bordo Poniente para el tratamiento de los residuos orgánicos generados en la ciudad, sus características se presentan en la tabla 4.

Tabla 4 Características de la planta de composta de bordo poniente

Instalación	Superficie (m ²)	Instalación	Superficie (m ²)
Superficie del predio para colocación del material en proceso:	30,000	Área techada para mantenimiento menor de maquinaria y equipos	600
Patio para recepción y acondicionamiento de residuos de poda	3,000	Almacén para maduración de composta (nave de la antigua planta de separación)	800
Oficinas, sanitarios, vestidores y área de comedor y caseta de vigilancia	150	Estacionamiento de maquinaria	2,772
		Almacén	264

Fuente: Dirección General de Servicios Urbanos, 2015

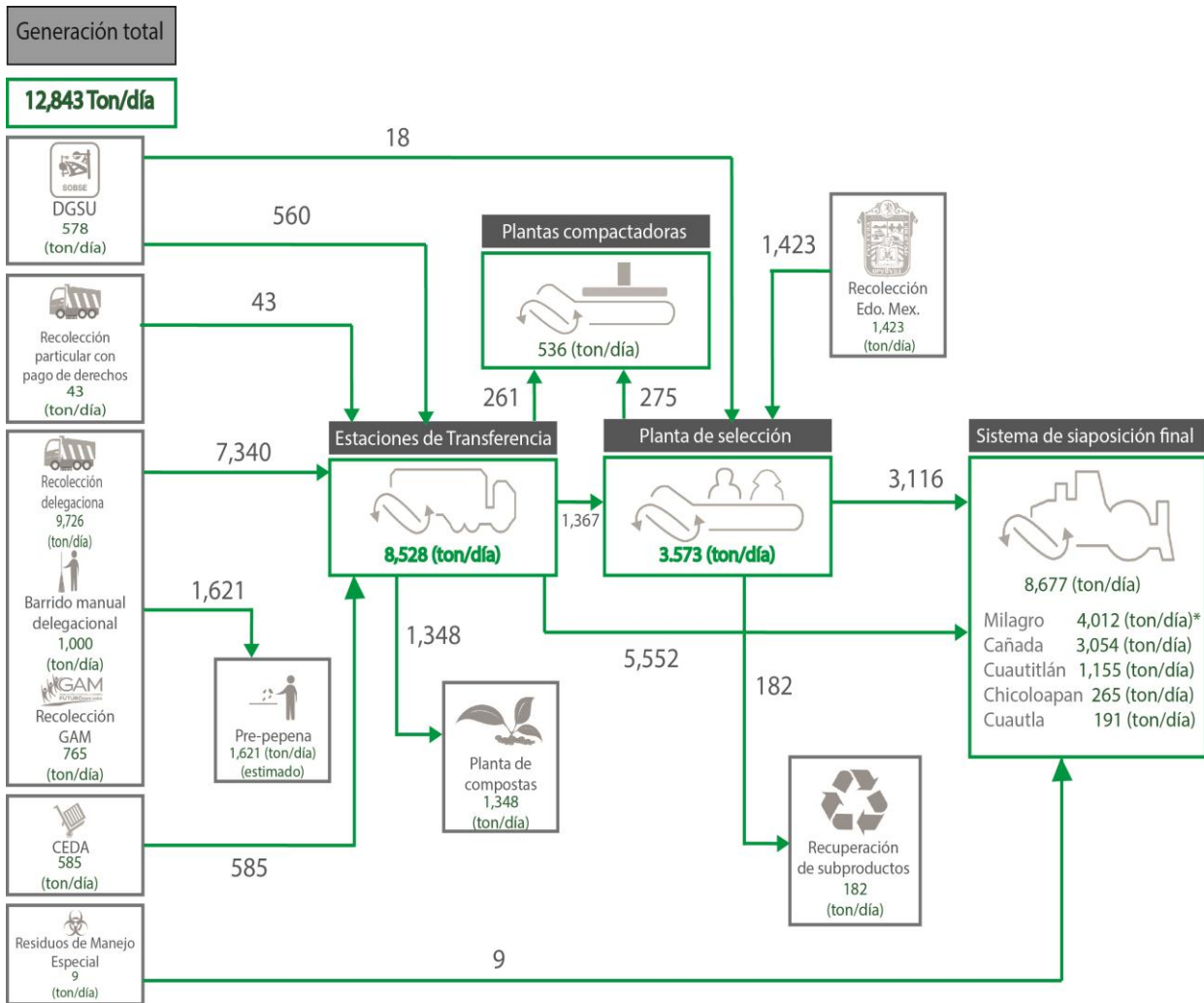


Figura 2 Diagrama de flujo de tratamiento de residuos sólidos urbanos

Fuente: Elaboración propia con base en la información del Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2013 (IRS)

Al analizar las cantidades de residuos enviados al Relleno Sanitario Bordo Poniente en el año 2010, el promedio fue 12,004 toneladas diarias, mientras que en el año 2014 disminuyó a 8,099 toneladas diarias, equivalente a una reducción de 39.6%, comprobando así la efectividad del programa.

El segundo sistema de tratamiento de residuos implementado con el PGIRS es el acondicionamiento y compactación de residuos para su procesamiento. Este consiste en un sistema de incineración de residuos con alto poder calorífico para aprovechar la energía de su combustión y utilizar esta energía como combustible alterno en los procesos de producción de una empresa cementera mexicana. Los residuos que no pueden ser aprovechados en este proceso son regresados a las estaciones de transferencia para su transporte a disposición final.

El último proceso de tratamiento utilizado en la CDMX es el que se lleva a cabo en las plantas de composta existentes en la ciudad, tanto la ubicada en el Bordo Poniente como en las diferentes demarcaciones de la ciudad. Todos los subproductos generados de estas plantas son utilizados para mejorar las áreas verdes dentro de la Ciudad de México.

Como se puede ver en la Tabla 1, en la CDMX predominan los residuos orgánicos, así como los productos de papel y plásticos en segundo y tercer lugar respectivamente. Si consideramos que estos tres tipos de residuos pueden aprovecharse a través de diferentes procesos ya existentes, es más fácil entender por qué estos no deberían ser considerados como materiales de desecho, sino como recursos desaprovechados que podrían ayudar a la conservación de recursos naturales.

Los procesos implementados en la Ciudad de México para el tratamiento de residuos, a pesar de estar mejor organizados y desarrollados, siguen siendo insuficientes. La infraestructura actual de la ciudad es insuficiente para hacer el tratamiento efectivo de la totalidad de los residuos generados o alcanzar a todos los sectores de la población. Además, existen limitaciones en el servicio, en los rellenos sanitarios e inclusive en los medios para transportar los residuos. Todos ellos, son un claro indicador de lo necesaria que es la implementación de más y mejores proyectos para el tratamiento de residuos sólidos.

3. Introducción

Este trabajo está dividido en ocho secciones, a través de las cuáles se presentan las actividades que se desarrollaron durante este proyecto.

En la primera sección se presentan más a fondo los detalles del tratamiento de residuos conocido como digestión anaerobia, los diferentes tipos de proceso que puede tener este método de tratamiento, así como los productos que se generan con el proceso y sus características para posteriormente presentar las características generales que llevaron a la construcción de la planta piloto MBio y sus características.

En la segunda sección se presentan de manera general y particular los objetivos identificados para este proyecto.

El marco teórico, describe el nopal como la materia prima utilizada para llevar a cabo este proceso, su importancia para los pobladores de Milpa Alta y para su forma de vida, así como las características que hacen de esta materia un buen residuo para la digestión anaerobia. En seguida se presenta la primera revisión del sistema existente en la planta, a través de una actualización de los diagramas de proceso de la planta, la revisión de las normas de la misma y una explicación más detallada del proceso que se lleva a cabo en la planta, así como la forma en la que este se ha comportado desde su arranque hasta ahora para sentar las bases del trabajo que se realizó.

Posteriormente, se habla sobre la propuesta elaborada en este trabajo para poder llevar la planta de digestión a una operación de equilibrio, especificando la forma de alimentación que se seguirá, las necesidades que tiene el proceso y que se tienen que acordar con los productores de nopal, así como los métodos utilizados para hacer el seguimiento de laboratorio de los parámetros fisicoquímicos del proceso.

A continuación, se muestran los resultados de los análisis de laboratorio especificando los resultados de cada prueba realizada y en seguida se presenta el análisis de estos mismos resultados.

Finalmente, en las últimas tres secciones del trabajo se presentan las conclusiones de este proyecto y las recomendaciones consideradas para mejorar el proceso.

4. Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos

Con la cantidad de residuos orgánicos que se generan en una ciudad del tamaño de la Ciudad de México, su tratamiento debería ser uno de los enfoques más importantes, ya que además de las implicaciones antes mencionadas sobre su manejo y disposición, la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos contribuye a la generación de gases de efecto invernadero.

Para resolver el problema de los residuos biodegradables existen diferentes opciones de tratamiento biológico, algunas de las cuales ya se han aplicado en la CDMX. A pesar de que estos procesos no han sido implementados por completo, una buena planeación y adecuación ayudaría a mitigar la problemática dándole valor agregado a estos residuos.

Uno de los tratamientos más utilizados es la digestión aerobia, la cual requiere oxígeno atmosférico durante el proceso de descomposición, generando calor, CO₂, vapor de agua y compost como subproductos de la descomposición (Clemente Reyes et al., 2015). Este tratamiento puede ser clasificado en dos tipos de tratamiento, el compostaje regular, durante el cual el material orgánico se descompone en material húmico. Para lograr esto, los residuos atraviesan por cuatro fases de proceso.

1. Fase mesófila, durante la cual la temperatura dentro de la composta comienza a elevarse por acción de los microorganismos que comienzan a hacer la digestión.
2. Fase termófila, donde la temperatura de la composta llega a temperaturas de entre 45 y 70°C, lo cual permite una mayor proliferación de bacterias y actinomicetos.
3. Fase de enfriamiento, posterior a alcanzar su temperatura máxima, la composta comienza a tener una disminución de temperatura lo que permite el crecimiento de hongos.
4. Fase de maduración, finalmente los hongos predominan como microorganismos presentes en la mezcla, gracias a lo cual son eliminadas las bacterias que pueden ser patógenas para las plantas.

El segundo tipo de compostaje llamado *lombricomposta* aprovecha las capacidades de ciertos tipos de lombrices de tierra que degradan la materia orgánica de manera más rápida y sin necesidad de tantos cuidados por la gran capacidad de adaptación que tienen las lombrices. Este proceso depende casi por completo de las lombrices y al final se obtiene una composta rica en nutrientes que ayuda al crecimiento de vegetación y mejora las características fisicoquímicas del suelo. A pesar de ser un proceso útil, el compostaje en general requiere de grandes superficies y largos periodos de tiempo para la digestión. Además, solo se produce mejorador de suelos como producto de este proceso, perdiendo así otros productos aprovechables.

Otro método utilizado en la Ciudad, pero en menor medida, es el proceso de digestión anaerobia (Monroy et al., 1998), el cual consiste en la descomposición de materia orgánica en componentes más simples sin necesidad de oxígeno atmosférico en la reacción. Este es utilizado para el tratamiento de residuos orgánicos como Residuos Sólidos Urbanos de tipo orgánico, residuos de granjas y parques y residuos industriales de origen animal y vegetal.

Este proceso puede ser utilizado con el objetivo específico de tratar residuos biodegradables, pero es más utilizado en la generación de productos con mayor valor agregado como biogás y mejorador de suelo con el fin de hacerlo económicamente viable. La calidad de los productos obtenidos con este proceso dependerá de la calidad de la materia prima y su nivel de toxicidad, lo cual puede alterar el desarrollo de alguna de las poblaciones bacterianas y, en consecuencia, los productos del proceso.

Antes de ingresar los residuos al reactor de digestión, es necesario hacer un pre-tratamiento de los residuos. Esto implica el remover cualquier material no biodegradable que pueda afectar el proceso. Esto se puede llevar a cabo a través de un proceso de separación desde la fuente de los residuos, o por separación mecánica lo cual usualmente implica cierto nivel de contaminación de la materia prima, ya que con un sistema de este tipo es casi imposible retirar contaminantes pequeños, lo cual afectará posteriormente al proceso.

A continuación, los residuos entran al digestor, el cual puede ser clasificado dependiendo del número de etapas que tenga, la temperatura de proceso y el contenido de sólidos dentro del proceso.

- Proceso de una sola etapa con bajo contenido de sólidos (SSLS)

Este tipo de proceso es comúnmente utilizado para estabilizar lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales.

A pesar de ser un proceso simple, tener tecnología conocida y necesitar de menor inversión en cuanto a equipos de proceso, también implica una serie de problemas ya que es necesario tener un pretratamiento particular, debido a que la materia prima que se introduce al reactor debe ser diluida y la mezcla resultante que es introducida al reactor puede decantar, haciendo que la fracción pesada de la mezcla dañe los equipos del reactor y proceso. Además, este pretratamiento genera una pérdida de un 15-20 % de componentes volátiles, que redundan en un decremento en la calidad del gas producido.

Se recomienda utilizar un reactor de mezcla continua (CSTR) para evitar la decantación dentro del reactor.

- Proceso de una sola etapa con alto contenido de sólidos (SSHS)

Este proceso fue diseñado en 1980 con el fin de obtener un mayor rendimiento con residuos no diluidos. Este tipo de proceso requiere de una mayor inversión en el sistema de transporte de la materia prima, ya que por su viscosidad ocupa equipos de mayor potencia.

Por otra parte, las ventajas de éste también son significativas. El pretratamiento de la alimentación es mucho menos específico lo que reduce las pérdidas de materia orgánica en esta etapa del proceso. El contenido de sólidos en la alimentación del reactor es de un 20-40 % lo que genera un mayor rendimiento y además reduce gastos en el reactor ya que no es necesario tener un sistema de mezclado dentro del mismo por lo que se pueden utilizar reactores de flujo pistón. Por sus características, este tipo de proceso no requiere de agua extra ni de tanto control en el sistema de calentamiento.

- Proceso multi-etapas (MSP)

Este tipo de proceso tiene como objetivo mejorar el rendimiento separando el proceso de digestión en diferentes etapas las cuales ocurren en reactores independientes para optimizar las reacciones de hidrólisis/acetogénesis y metanogénesis.

Durante la hidrólisis de los residuos se lleva a cabo una reacción de descomposición de la materia polimérica compleja por medio de enzimas hidrolíticas como la proteasa o lipasa secretada por los microorganismos en compuestos más simples como glucosa, ácidos grasos y aminoácidos. A pesar de que algunos productos de la hidrólisis pueden ser utilizados para la metanogénesis, la mayor parte de productos está conformada por moléculas largas que necesitan ser descompuestas en moléculas más sencillas.

Posterior a la hidrólisis, dentro del mismo reactor, se llevan a cabo los procesos de acidogénesis, donde los productos son transformados en compuestos más simples como ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La acidogénesis es seguida por la acetogénesis, donde reaccionan los ácidos orgánicos remanentes. Estos dos procesos son difíciles de distinguir, ya que ambos tienen los mismos productos útiles para el último proceso, la metanogénesis.

La última reacción, que se lleva a cabo en el segundo reactor del proceso multi-etapas, es también el paso crítico, ya que la reacción es la más lenta del proceso. En esta etapa actúan arqueas anaerobias estrictas las cuales son sensibles al ambiente de crecimiento. Durante este paso las arqueas metabolizan los productos de las reacciones previas para generar dióxido de carbono, hidrógeno y metano.

El proceso multi-etapas también puede ser clasificado por su contenido de sólidos, los cuales presentan las mismas ventajas y desventajas existentes en los procesos SSLS y SSHS. La ventaja del proceso multi-etapas sobre el de una sola etapa radica en la estabilidad de los sistemas biológicos que se llevan a cabo en el reactor y es comúnmente utilizado cuando la materia prima no tiene un comportamiento estable en una sola etapa.

- Proceso Batch

En este tipo de proceso el reactor es llenado con residuos frescos y se deja que se lleven a cabo todas las etapas de la degradación secuencialmente en un ambiente seco, posteriormente el lixiviado de los fondos es recirculado continuamente. Este tipo de procesos es clasificado en:

- Sistema de una etapa: el lixiviado se recircula de los fondos al domo.
- Sistema secuencial: dos reactores donde el lixiviado del primero se recircula al segundo, posteriormente, el lixiviado del segundo reactor es mezclado con un agente alcalino y recirculado al primero, lo cual garantiza inoculación entre ambos reactores.

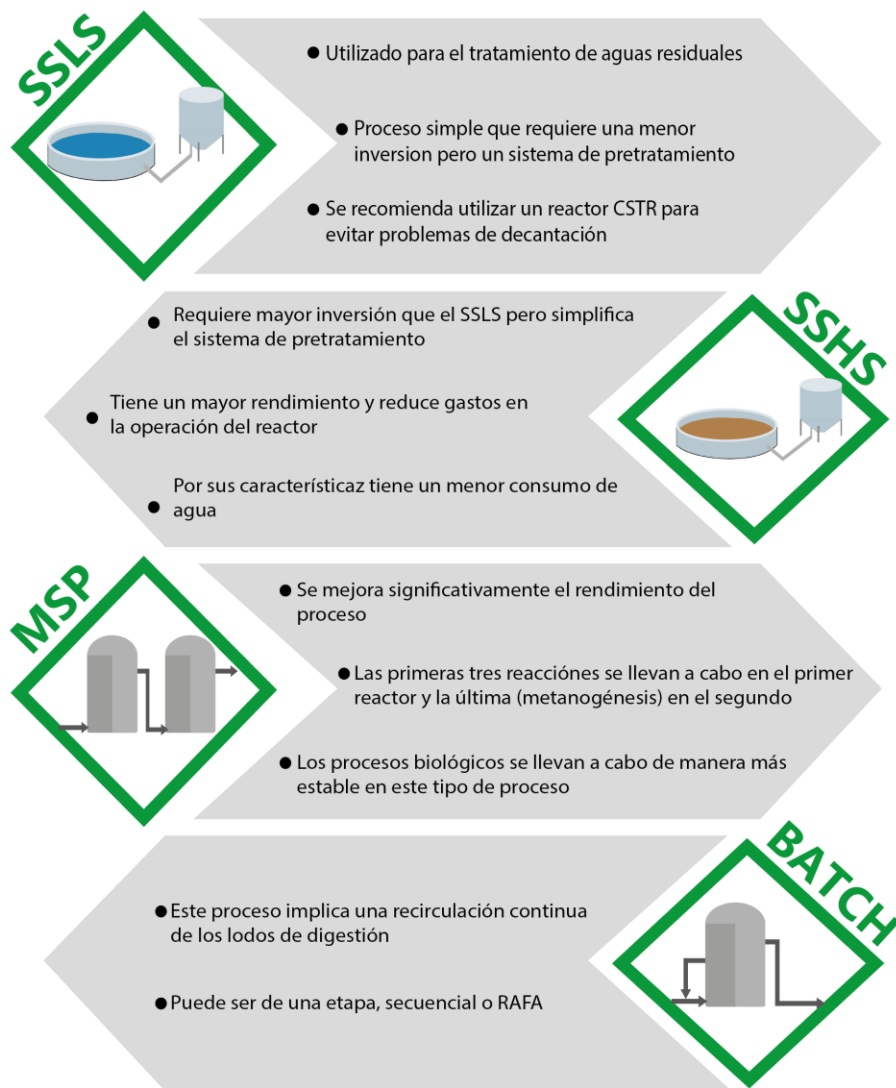


Figura 3 Clasificación de los procesos de tratamiento

Fuente: Elaboración propia.

Cualquiera de los procedimientos que se utilice para la biodigestión anaerobia necesita de ciertas condiciones del sistema para operar de manera correcta y obtener los productos esperados. Las variables de operación del sistema deben ser controladas para asegurar la actividad de las bacterias y aumentar la eficiencia de la digestión. Los parámetros a controlar en el sistema son:

- **Contenido de sólidos:** El contenido de sólidos en el sistema puede variar entre 10%, en un sistema de bajo contenido, 15-20% en un sistema de medio contenido y 22-40% en un sistema de alto contenido de sólidos. Generalmente, los residuos contienen fracciones biodegradables, combustibles e inertes, esta última debe ser removida antes de iniciar el proceso de digestión, ya que afecta la eficiencia del sistema.
- **Temperatura:** Dependiendo de la temperatura que se maneje en el reactor el proceso puede ser termofílico (50-65°C) o mesofílico (20-45°C). De igual manera, la temperatura ideal depende de la tecnología seleccionada y la composición de la alimentación. Cualquier tipo de proceso debe mantener una temperatura relativamente constante para mantener su producción de gas.
- **Tiempo de retención:** Este es el tiempo que necesita el sistema para que toda la materia orgánica sea degradada, este depende de parámetros del sistema tales como temperatura y composición de la alimentación.
- **Potencial de Hidrógeno (pH):** El pH óptimo varía dependiendo de la reacción que se esté llevando a cabo, al generarse ácidos durante la acidogénesis el pH baja, por lo que se puede inhibir la reacción. Además, esto es tóxico para las bacterias presentes en la metanogénesis que son muy sensibles a la concentración de ácido en el digestor. El pH óptimo de proceso está entre 6.4 y 7.2.
- **Relación carbono-nitrógeno (C:N):** Esta variable sirve como indicador de las etapas previas a la metanogénesis, un valor alto de C:N significa que el nitrógeno está siendo consumido muy rápido y esto genera una menor producción de gas, mientras que un C:N bajo implica acumulación de amonio, lo cual es tóxico para las bacterias metano génicas. Un valor óptimo de C:N se encuentra entre 20 – 30 unidades.

- Composición del mejorador de suelos: Al finalizar la digestión, los residuos sólidos son secados y se forma compost a partir de éstos. La calidad del compost dependerá de la composición de la materia prima, dependiendo de esto el producto final puede contener metales pesados o compuestos nocivos que impidan su distribución. Según la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-020-AMBT-2011, donde se establecen los requerimientos para producción, calidad y distribución de compostas en el Distrito Federal, establece las especificaciones y usos que se le pueden dar a la composta producida en la ciudad.

Tabla 5 Características de los tipos de composta

Parámetro	Tipo de composta		
	A	B	C
Uso recomendado	Sustrato en viveros y sustituto de tierra para maceta	Agricultura ecológica y reforestación	Paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación
Humedad	25-35 % en peso		25-45 % en peso
pH	6.7-7.5		6.5-8
Conductividad eléctrica	< 4 dS/m	< 8 dS/m	< 12 dS/m
Materia orgánica	> 20 % MS		> 25 % MS
Carbono total			
Nitrógeno total % MS	Debe indicarse en la etiqueta el resultado del último análisis realizado		
Relación C/N	< 15	< 20	< 25
Macronutrientes (NPK) en % MS	De 1% a 3% en cualquiera de ellos y su suma ≤ 7%: portará la leyenda "Composta-mejorador de suelos. Si cualquiera excede 3% o la suma es mayor a 7% Debe portar la leyenda "Composta para nutrición vegetal" y se indicarán las cantidades para cada macronutriente.		
Granulometría	≤ 10mm		≤ 30 mm
Fito toxicidad (IG)	IG ≥ 85 %	IG ≥ 75 %	IG ≥ 60 %
Diferencia de temperatura con el ambiente medida a una profundidad ≥ 50 cm	≤ 10°C		≤ 15°C

Fuente: Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-020-AMBT-2011.

- Composición del biogás

El biogás obtenido como producto generalmente consiste en una mezcla de diferentes compuestos, usualmente se producen entre 11 y 200 m³ de gas por tonelada de residuos.

Tabla 6 Composición general del biogás

Composición típica del biogás	
Metano	55-77 %
Dióxido de carbono	30-45 %
Ácido sulfhídrico	200-4000 ppm
Contenido energético del gas producido por la digestión	20-25 MJ/m ³
Contenido energético de CH ₄ por tonelada de RSU	167-373 MJ/ton

Fuente: Manual de biogás, FAO, 2011.

Tomando en cuenta la necesidad de la CDMX de más y mejores procesos de tratamiento de residuos; y aprovechando el potencial de los residuos orgánicos, la empresa SUEMA® desarrolló el proyecto MBio (ver anexo 1), el cuál utiliza tecnologías ya conocidas para el aprovechamiento de los RO, para generar un mejorador de suelo, aprovechar el potencial de los RO para generar energía, además de facilitar el transporte y recolección de dichos residuos. Así, con la implementación del proyecto se busca dar solución a tres problemas:

- Reducción de los RO en el área en un 50% por lo menos.
- Reducir la Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmosfera.
- Reducir el uso de combustibles fósiles.

Para alcanzar estos objetivos, el proyecto plantea implementar un sistema modular de tratamiento en sitio de RO el cual consiste en un arreglo con la capacidad de procesar 3 toneladas al día de RO en un área de 50 m². Al finalizar el proceso, se obtendrán entre 110 y 120 L de biogás por cada kg de RO tratado.

El proceso consta de un sistema de biodigestión anaerobia integrado por las siguientes etapas:

1. Disposición de los residuos por los usuarios del MBio.
2. Canalización y trituración de los RO.
3. Transporte de los residuos acondicionados de la cámara de trituración al interior del reactor.
4. Sistema de calentamiento combinado con aprovechamiento de energía solar y de combustión.
5. Reactor de degradación acelerada de RO por medio del proceso de biodigestión anaerobia termofílica.
6. Purificación del biogás por medio de filtros para retirar los gases corrosivos.
7. Sistema de generación de energía eléctrica con interconexión a la red pública.
8. Separación de subproductos sólidos y líquidos y acondicionamiento de ambas para su aprovechamiento.
9. Sistemas de control de proceso.

Este proyecto, además, busca que todo el proceso sea implementado dentro de los Mercados de Abasto Popular de la Ciudad (MAP). Los MAP son puntos de generación de los mayores volúmenes de RO. Los residuos generados dentro de los MAP deben ser transportados a estaciones de transferencia para su posterior tratamiento. El confinar el sistema de tratamiento al mismo sitio de generación, implica importantes ahorros en el transporte de residuos. Además, en los MAP conviven diferentes sectores de la sociedad mexicana con diferentes fines, convirtiéndolos en lugares de gran tradición y riqueza cultural y que forman parte de la cotidianidad de la población. El tener un proyecto con estas características, favorecería no solamente la mejora de la infraestructura del recinto; también ayudaría a enriquecer e integrar a la sociedad a los procesos de tratamiento de residuos. En la Figura 4 se presenta el esquema de la planta MBio.

El proyecto MBio actualmente se encuentra ubicado junto al Centro de Acopio y Comercialización de Nopal Verdura (CANV) en la alcaldía Milpa Alta, ya que los residuos generados en este mercado cumplen con las características necesarias tanto en términos de volumen como de componentes biodegradables. Otra de las razones para implementar el proyecto en esta delegación, es que Milpa Alta mantiene una gran riqueza cultural a través de los nombres de los 12 pueblos que

conforman la demarcación, las festividades religiosas y la identidad de sus habitantes.

La población de esta zona demanda un impulso a actividades relacionadas con la agricultura ya que el 60% del sector primario se dedica al cultivo del nopal.

El proyecto MBio tiene la intención no solo de funcionar como una alternativa para el tratamiento de residuos y un laboratorio para mejorar el conocimiento en los sistemas de gestión de residuos urbanos, sino también como un proyecto social dentro de la alcaldía Milpa Alta, una zona con una población en su mayoría rural con la necesidad de mejorar su infraestructura agropecuaria y que, además, representa un recurso estratégico para toda la Ciudad tanto en aspectos de sustentabilidad como en riqueza cultural, conservando aún aspectos como los nombres de los poblados que existían desde épocas prehispánica. La alcaldía, además, participa de manera ejemplar en el sistema de gestión de residuos, siendo ésta la que mayor eficiencia en la separación de residuos presenta en la ciudad, por lo que hay un gran potencial al desarrollar el proyecto en esta localidad.

A pesar de esto, la planta no ha alcanzado el equilibrio, el presente proyecto plantea que, a través de un aumento gradual en la alimentación y con un seguimiento detallado del proceso y los productos obtenidos será alcanzar dicho equilibrio al alcanzar una alimentación mayor a una tonelada por día. En la Tabla 7 se presentan los alcances de diseño de la planta.

Tabla 7 Capacidad del proceso MBio

Capacidad del proceso MBio	
Residuos orgánicos tratados	3000 kg/día
Biogás producido	≤ 350 m ³ /día
Mejorador de suelos producido	≥ 1000 kg/día
Humedad recuperada para uso agrícola	≥ 1500 L/día
Potencia del generador	40 kW
Energía generada	≤ 250-300 kWh/día

Fuente: Reportes de diseño de SUEMA®

5. Objetivos

5.1. General

Lograr que, a través de la propuesta de alimentación de este proyecto se llegue al equilibrio químico de las bacterias dentro de la planta, logrando así una alimentación constante con una producción de biogás dulce acorde a lo reportado en la literatura (Varnero, 2011), haciendo un seguimiento constante de las variables fisicoquímicas del proceso por medio de las pruebas de laboratorio correspondientes.

5.2. Particulares

- Elaborar un proyecto de tesis que sirva como seguimiento de un proyecto de escala industrial para documentar el funcionamiento del proceso.
- Aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera en el ámbito de los procesos industriales, así como su operación y administración.
- Monitorear la composición del biogás durante la estabilización y operación de la planta a fin de garantizar el cumplimiento de la normatividad aplicable, así como encontrar las condiciones que generen el mejor producto de proceso.
- Mapeo y análisis de las etapas de proceso de la planta MBio para comprobar el funcionamiento global.
- Corroborar el avance del proceso conforme al análisis de las variables y su relación al aumento de la carga orgánica.
- Analizar e identificar las propuestas de mejora al proceso o sistemas de la planta MBio.



Figura 4 Esquema de la planta MBio

Fuente: Reportes de diseño de SUEMA®

6. Marco teórico

6.1. El nopal como biomasa

Las cactáceas son uno de los grupos botánicos más abundantes en México, existe una gran variedad de especies cada una con diferencias en su morfología y adaptación al medio en el que habitan. Una de las cactáceas más conocidas en nuestro país es el nopal, perteneciente al género *Opuntia*³, del que derivan gran cantidad de especies endémicas y que representa una de las hortalizas de mayor importancia en nuestro país (Leonardo & Rodríguez, 2015).

En México el nopal se cultiva casi exclusivamente para el consumo humano debido a las propiedades nutricionales que se han encontrado en este, contiene beta caroteno, polifenoles y vitamina C, fibra, fibra soluble, proteína y un alto contenido de calcio que lo hacen parte importante de la dieta de los mexicanos.

Debido a su alta capacidad de adaptación a su entorno, su cultivo se ha proliferado como un cultivo más rentable que otros productos como el maíz o la avena. En la

³ Género de plantas de la familia de las cactáceas con más de 300 especies.

zona de Milpa Alta sólo en el año 2014 se sembraron 2,850 hectáreas de nopal verdura, con una producción de 292,983.6 toneladas en ese año. Con una producción tan alta en esta zona, los agricultores han llegado a tener problemas en la caída del precio de venta del nopal llegando a precios de hasta ocho pesos por 500 nopales lo que provoca disgusto y que en épocas de sobreproducción los agricultores prefieran utilizar sus cultivos como abono para sus mismos terrenos. Con esto en mente, los productores han buscado desarrollar nuevos productos o formas para aprovechar los nopales y así lograr que estos mantengan su valor agregado (SEDEREC, 2018).

Con el auge de las energías renovables y las leyes que han sido aprobadas últimamente con las que se apoya a proyectos sustentables, una de las opciones exploradas en los últimos años, es el aprovechamiento de los residuos de nopal para la producción de biogás. Según un estudio realizado por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) donde se analizaron nopales de la ciudad de Cuernavaca, el contenido promedio de sólidos volátiles es de 60 kg SV/ Mg de nopal con una humedad de entre el 90 y 95%. Además, en su estudio estiman un potencial de hasta 40 m³ de biogás por mega gramo tratado (Leonardo & Rodríguez, 2015).

Con los datos anteriores y con la producción que se tiene en Milpa Alta se puede estimar que en un año en él que se aproveche por lo menos la tercera parte de la producción de nopal, se podrían emplear 97,661.2 toneladas de biomasa, lo cual representaría la generación de 3, 906,448 m³ de biogás al año. Tomando en cuenta la equivalencia de generación eléctrica por m³ de biogás (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2012), con esta cantidad de biogás se tendría una producción anual de hasta 21.485 GW-h/año. La cual, considerando el último reporte de la delegación en el que se indica que la delegación tuvo un consumo de 47.31 GW-h/año en el año 2012 (Delegación Milpa Alta, 2015). La generación de energía con biogás utilizando una tercera parte de la producción de nopal de la alcaldía, podría abastecer el 45.41% de su energía eléctrica en un año. Además, considerando los datos de la SEMARNAT en los que se reporta una generación de 0.454 toneladas de CO₂/MWh (SEMARNAT, 2015), la producción de energía eléctrica reduciría las emisiones de CO₂ al ambiente a 9754.19.

Se caracterizó el residuo de nopal del Centro de Acopio Nopal Verdura (CANV), cuya planta estaría ubicada a un costado de este lugar, los análisis fueron realizados por colaboradores de SUEMA® y su equipo en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD) del Instituto Politécnico Nacional y la Facultad de Ciencias de la UNAM. La caracterización fisicoquímica de los residuos se hizo según la norma APHA 2005 Métodos Normalizados para el análisis de Aguas Potables y Residuales E.E.U.U. obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8 Caracterización fisicoquímica de los residuos orgánicos del CANV

Parámetro	Unidades	Nopal
Número de muestras		3
Potencial de hidrógeno (pH)		4.006 ± 0.081
Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/m	1.96 ± 0.12
Humedad	%	89.41 ± 0.15
Potencial de oxidación-reducción (ORP)	(mV)	230.11 ± 3.79
Porcentaje de CO	%	44.51 ± 0.10
Demanda Química de Oxígeno (DQO) soluble	mg O ₂ /kg sustrato seco	366.80 ± 7.87
Demanda Química de Oxígeno (DQO) total	mg O ₂ /kg sustrato seco	995 ± 143
Sólidos totales (ST)	%	10.51 ± 0.14
Sólidos volátiles (SV)	%	80.08 ± 0.165
Nitrógeno total (NT)	% base seca	1.8 ± 0.0008
N-NH ₄	(mg/kg)	0.903 ± 0.085
N-NO ₃	(mg/kg)	0.151 ± 0.02
Potasio (K)	% base seca	4.6 ± 0.2
Relación C/N		29.90 ± 3.20

Fuente: Reportes de diseño de SUEMA®

La calidad del biogás producido en un proceso anaerobio depende de los nutrientes presentes en la alimentación, así como su concentración. Las principales fuentes de alimentación para las bacterias responsables de la metanogénesis son: el carbono como fuente de energía y el nitrógeno para la formación de nuevas células. Está reportado en la literatura (Varnero, 2011) que un rango óptimo para la relación carbono/nitrógeno en la alimentación está entre 20 y 30 unidades, por lo que con los resultados de la caracterización podemos decir que los residuos de nopal del CANV tienen una relación C/N buena.

Otro factor importante a considerar es el % de sólidos totales y sólidos volátiles. Los sólidos totales pueden afectar la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro

del sustrato por lo que la carga de alimentación debe estar en el rango de entre 8% y 12% de sólidos totales, la caracterización señala que los residuos tienen un porcentaje igual a 10.51 ± 0.14 por lo que su porción de sólidos es óptima para el proceso y, además, el porcentaje de sólidos volátiles, que se espera contengan componentes orgánicos que serán convertidos a metano, es alto.

6.2. Diagrama de flujo de proceso

Se revisó también el diagrama de proceso. Durante la operación de la planta se han dado cambios en la ingeniería del proceso por lo que, para detectar cualquier error o falla, se actualizó el diagrama de flujo del proceso (DFP), para identificar si toda la información se encontraba actualizada, tomando en cuenta las medidas correctivas y cambios que se hicieron con el tiempo.

Se realizaron las siguientes correcciones a este diagrama:

- a) Simplificación del sistema de alimentación de solución amortiguadora: El sistema diseñado para hacer la alimentación de una solución amortiguadora a la corriente de entrada del biodigestor contaba con dos tanques de almacenamiento (TQ-240 y TQ-260). A pesar de estar dentro de las inmediaciones de la planta, el tanque TQ-240 no está habilitado para formar parte del sistema y su bomba correspondiente BC-250 se mantiene detenida.

Durante la operación de la planta se puede diluir la alimentación de residuos orgánicos para mejorar la digestión, estos componentes son introducidos y almacenados en el tanque TQ-260. En la Figura 5 se muestran los equipos antes mencionados.

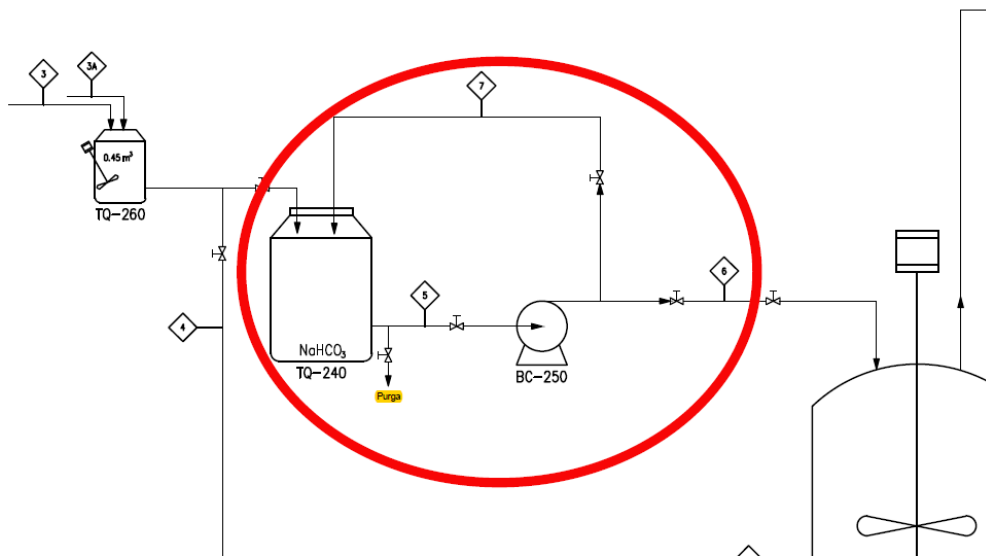


Figura 5 Sistema diseñado para la alimentación de solución buffer

Fuente: Diagrama de Flujo de Procesos de SUEMA®

Para el diagrama actualizado se deshabilitaron las corrientes y se mantuvieron como corrientes de respaldo en caso de que el tanque TQ-260 no se encuentre en operación.

- b) Especificación de equipo faltante: Dentro del DFP previo se encontró que algunos de los equipos presentes en el diagrama no estaban especificados en la sección correspondiente, por lo que se procedió a verificar su existencia dentro del proceso y, en caso de estar presentes y ser funcionales, se utilizaron sus fichas técnicas para hacer su especificación correspondiente en el documento. Las Figuras 6 y 7 presentan los equipos FS-520A, FS-520B, CS-701, CS-702 y CS-703 que fueron especificados en la actualización del diagrama.

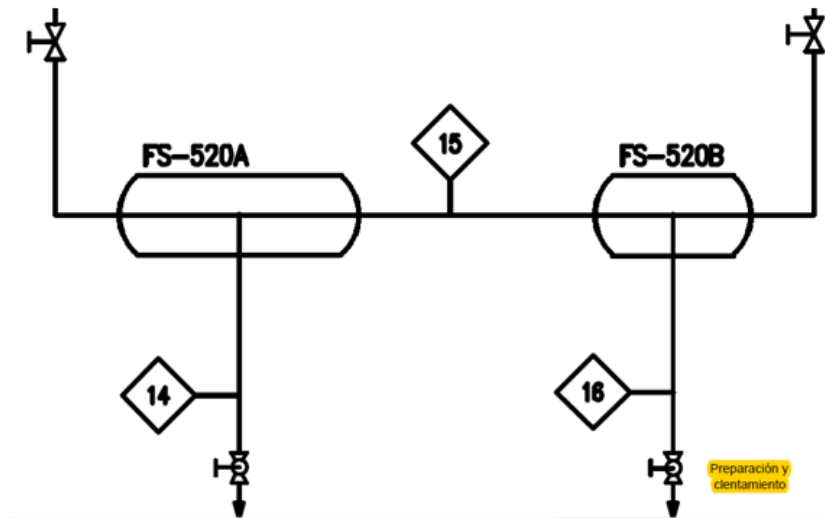


Figura 6 Condensadores de humedad del biogás

Fuente: Diagrama de Flujo de Procesos de SUEMA®

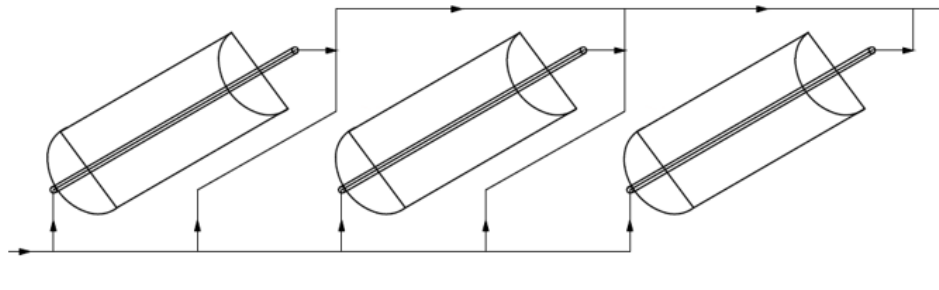
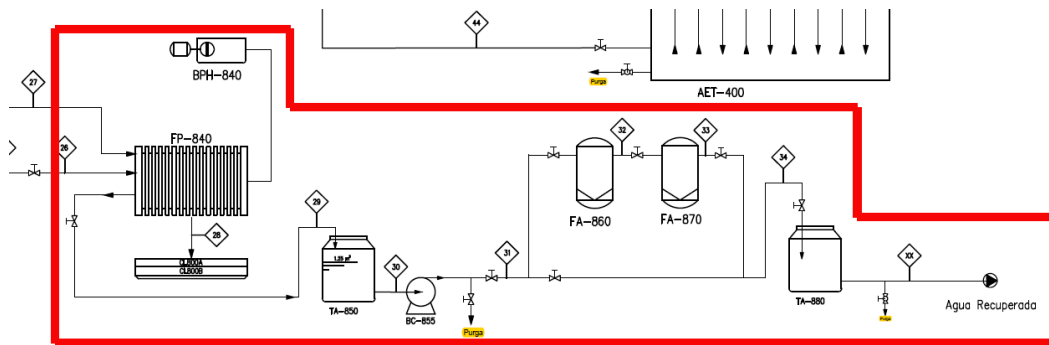


Figura 7 Colectores solares para calentamiento de agua

Fuente: Diagrama de Flujo de Procesos de SUEMA®

- c) Actualización del sistema de tratamiento de lodos de digestión: Debido al acuerdo que se generó con los productores de nopal y con la alcaldía de Milpa Alta se decidió cambiar el sistema de tratamiento de lodos de digestión por un tanque contenedor de lodos para manejo de las autoridades de la alcaldía y de esta forma ellos se encargan de la gestión de estos residuos. Esta decisión generó la eliminación de los equipos mostrados en la Figura 10 en el diagrama de procesos.



Fuente: Diagrama de Flujo de Procesos de SUEMA®

Figura 8 Equipos no necesarios para el tratamiento de lodos

- d) Corrección de corrientes de proceso: Los cambios realizados en los equipos existentes en el diagrama previo generaron cambios en las corrientes de proceso que también fueron actualizadas. Además, se hizo la corrección de algunas corrientes mal especificadas en el diagrama anterior, la más significativa se presenta en la figura 9 donde se muestra un choque de corrientes en la entrada de agua al serpentín de calentamiento del reactor.

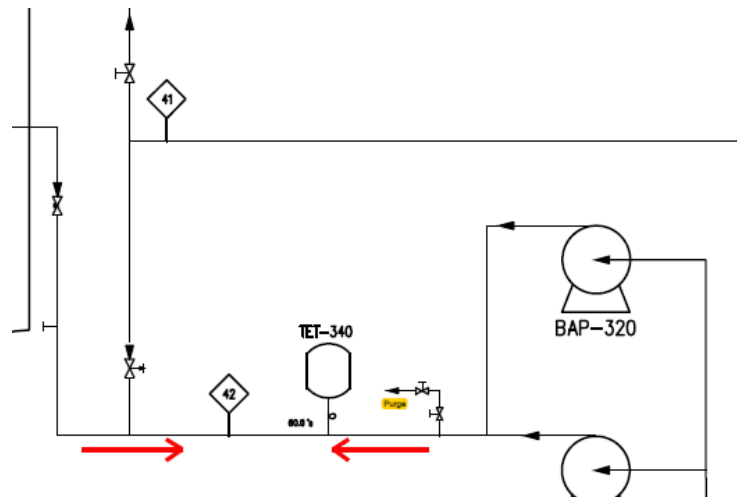


Figura 9 Corrientes de proceso corregidas

Fuente: Diagrama de Flujo de Procesos de SUEMA®

- e) Balance de materia: El diagrama del anexo 1 presenta un apartado con un balance de materia y la especificación de los diferentes equipos presentes en el proceso, este apartado fue modificado como consecuencia de las actualizaciones mencionadas previamente.

El diagrama de flujo actualizado se presenta en los Anexos 3 y 4.

6.3. Marco normativo de la planta MBio

Además de la revisión del diagrama de proceso, se verificó que se cumpliera con el marco normativo necesario para la construcción de una planta de biogás en la Ciudad de México, con la verificación en sitio se corroboró que se cumple con:

- Art 31. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos: A pesar de no estar presente como tal en la norma, los lodos del proceso se manejan como lodos de plantas de tratamiento de aguas por lo que están sujetos al plan de manejo de residuos peligrosos.
- NOM-052-SEMARNAT-2005: El único residuo/producto peligroso que se produce en la planta es el biogás producto del proceso de digestión, mismo que es transportado en tuberías identificadas por el color establecido para gases inflamables por la NOM-026-STPS-2008. Dicho color identifica este gas en todo momento dentro de la planta hasta llegar a donde se quema.
- Art 37. de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos: Cuenta con el Programa de gestión de residuos de la Ciudad de México para hacer el mejor manejo de los residuos generados en planta tanto de proceso como de operación.
- NOM-019-STPS-2011: Al establecer una Comisión de Seguridad e Higiene en la planta para mantener el centro de trabajo y así evitar incidentes que puedan provocar accidentes, así como para generar medidas para prevenirlos.
- NOM-004-SEMARNAT-2002: Al mantener los límites máximos permisibles de contaminantes presentes en los lodos producto de la biodigestión, estos lodos se entregan a la alcaldía para su manejo adecuado, cabe señalar que esta norma contempla lodos provenientes de desazolve de sistemas de

alcantarillado urbano o de plantas potabilizadoras de agua, los cuales presentan más contaminantes que el lodo generado en la planta.

- NOM-052-SEMARNAT-2005: Al contemplar los residuos no peligrosos que se generan dentro de la planta para hacer su disposición correspondiente.
- NOM-026-STPS-2000: Al seguir con la simbología y colores de seguridad de todas las corrientes de proceso ya sean de alimentación o descarga y si estas representan un riesgo o no.
- NOM-005-STPS-1998: Al contar con las condiciones de Seguridad e Higiene en la planta y al informar al operador sobre las sustancias peligrosas que se llegan a manejar en la planta, brindando todo el equipo de protección personal para los trabajadores, así como los materiales para contener sustancias peligrosas y al mantener actualizado el manual de Seguridad e Higiene y mantenimiento de equipo dentro de la planta.
- NOM-010-STPS-1999: Al mantener a los trabajadores informados sobre los riesgos que se pueden presentar durante la operación de la planta, procurando siempre su salud y capacitándolos para actuar en consecuencia y tomar las medidas preventivas necesarias para que no ocurra ningún accidente. Además de realizar la vigilancia pertinente de la salud de los trabajadores.
- NOM-018-STPS-2000: Al contar con el sistema de identificación sustancias químicas peligrosas siguiendo el modelo del rombo, con las áreas de almacenamiento de sustancias bien señalizadas y con las hojas de datos de seguridad a la mano del operador en caso de requerirlos.

6.4. Proceso y evolución de la planta MBio

La planta MBio es el primer sistema socio-tecnológico diseñado para el tratamiento integral *in situ* de residuos orgánicos provenientes de mercados de abasto popular en la Ciudad de México, se encuentra en el Centro de Acopio de Nopal Verdura de la alcaldía Milpa Alta e inició como un proyecto en colaboración con la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECITI), la delegación Milpa Alta y el Centro de Acopio de Nopal Verdura.

La planta piloto ocupa un área de 238 m², donde se reparten las diferentes etapas del proceso. En el Anexo 2 se puede observar el primer Diagrama de Flujo de Proceso elaborado para la planta.

El proceso se basa en una revalorización de residuos de nopal con el fin de tratarlos a través de una digestión anaerobia, como resultado de este proceso se obtiene biogás compuesto principalmente por CO₂ y CH₄ el cual se utiliza para la cogeneración de energía eléctrica y térmica para ser utilizada dentro del proceso a través del calor de combustión de un moto-generador con combustible a biogás y, además, como fuente de energía para el mercado del Centro de Acopio. Como fuentes de energía para mantener el proceso en condición termofílica, se integró un sistema de captación de energía solar donde se genera energía para calentar agua, una caldereta de agua a gas, así como un moto-generador con combustible a biogás.

La operación de la planta se divide en las siguientes fases:

- Alimentación: En esta primera etapa del proceso se reciben los residuos de nopal del mercado de abasto popular que se encuentra a un costado de la planta, posterior a su recepción, la materia orgánica es triturada en el contenedor/triturador (TR-100) y, posteriormente, es bombeado con un equipo de cavidad progresiva (BCP-150).

Además, es posible alimentar al digester con una disolución alcalina utilizando bicarbonato de sodio (NaHCO₃) u otro agente básico y agua proveniente del tanque de almacenamiento (TQ-240). El propósito de añadir esta disolución, es regular el pH a la entrada del reactor y prevenir la acidificación del sistema.

- Digestión anaerobia: Al llegar al digester (RB-200) la materia orgánica es degradada a través de las siguientes reacciones:
 - Hidrólisis: Donde los compuestos orgánicos son solubilizados por la acción de enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas. En esta reacción se descomponen materiales orgánicos simples a sus respectivos monómeros.

- Acidogénesis: En esta reacción los compuestos orgánicos, producto de la hidrólisis, son convertidos en ácidos orgánicos como ácido acético, propiónico y butírico.
- Acetogénesis: Los productos de la acidogénesis son convertidos a ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (CO₂).
- Metanogénesis: En la etapa final de la digestión se produce el metano (CH₄) por acción de las bacterias metanogénicas que degradan el sustrato disponible.

Estas cuatro etapas metabólicas se describen en la Figura 10.

Dentro del digestor, un serpentín (IC-220) se encarga de transportar agua caliente para el calentamiento de la materia orgánica, lo cual es indispensable para mantener el proceso termofílico, mientras que un mezclador (ME-230) se encarga de que el digestato sea homogéneo.

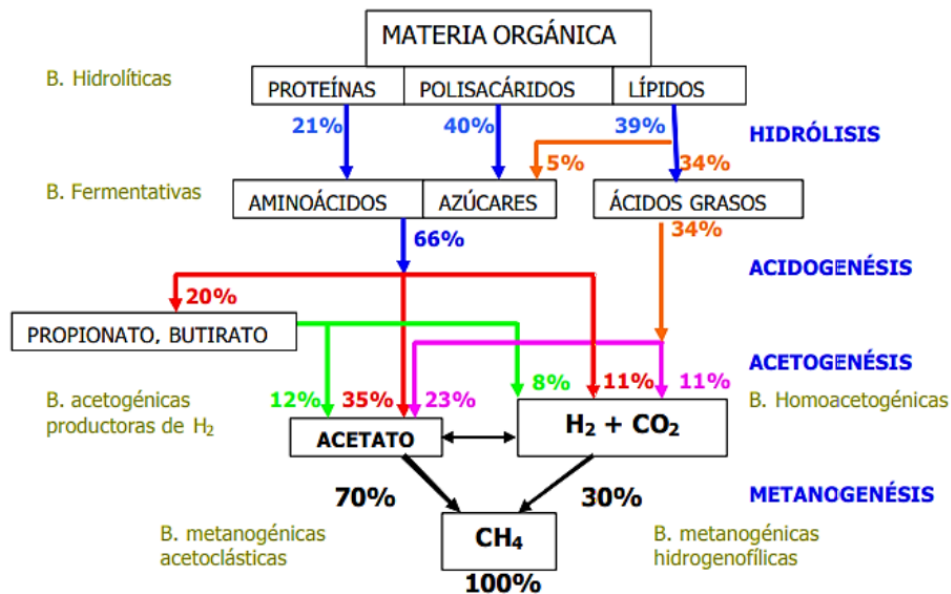


Figura 10 Esquema del sistema de degradación anaerobio

Fuente: Modificado de Pavlostathis y Giraldo-Gómez. 1991

- Purificación de biogás: Al finalizar la digestión, el biogás producido se conoce como biogás amargo, porque contiene diferentes sustancias (CH₄, CO₂, H₂S, H₂O) subproducto de la digestión. Después de salir del reactor, el gas pasa por

un par de condensadores (FS-520A y FS-520B) en los que se remueve la humedad. A continuación, pasa por un des-sulfurador (FG-530) el cuál se encarga de retirar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás para finalmente, dependiendo de la cantidad generada de biogás este pase al sistema de cogeneración para aportar energía al sistema o a la antorcha para ser quemado. El digestor cuenta con una válvula de seguridad para el alivio de presión en su interior (PSV-216), además, para mantener la presión del reactor por debajo de cualquier presión que pueda generar un incidente, existe otra válvula de operación manual (KV-213) la cual se abre para regular la presión y no llegar a los límites de la válvula PSV-216.

- Sistema de calentamiento: La digestión dentro de este reactor se lleva a cabo en condiciones termofílicas por lo que es necesario mantener la temperatura dentro del biodigestor en un rango entre 50 y 60 °C. Por esta razón es indispensable tener fuentes de energía térmica para que el sistema se mantenga funcionando correctamente. Para esto se utilizan dos tanques de almacenamiento térmico (AET-400 Y DET-300) que están conectados a colectores solares (CS-700), estos tanques también están conectados a un intercambiador de calor que utiliza el calor generado por los gases de combustión del sistema de cogeneración (MG-750). Esto permite que se mantenga la temperatura del sustrato a 55°C.

Existe además un sistema de cogeneración de energía eléctrica (GE-20) el cuál puede funcionar con gas LP o biogás, cuya finalidad es apoyar como segunda fuente de generación para mantener el proceso a la temperatura deseada.

- Sistema de filtración de lodos: A la salida del digestor se reciben los lodos residuales en un tanque (TA-810), donde son almacenados y después entregados a la alcaldía para ellos posteriormente hacer el manejo de los lodos. La planta cuenta con un proceso paralelo para el tratamiento de lodos, donde estos se mezclan con una solución floculante (polímero) para aglutinar las sustancias coloidales presentes en el digestato. Así la mezcla es tratada en el filtro prensa (FP-840), donde se remueve la humedad y se separa la fase solida de la mezcla. Los sólidos son posteriormente almacenados en la tolva (CL-800),

mientras que los líquidos pasan a un tanque de recuperación (TA-880), sin embargo, este proceso aún no se encuentra instalado por completo en la planta, ya que depende del destino final de los lodos.

- Sistema de control: La planta cuenta con un sistema de control automático, donde se reciben datos de las variables (temperatura, presión, nivel) de las diferentes etapas, por medio de un sistema de control de la planta. El tablero de control (TC-100) permite modificar variables y tiempos de operación del sistema, los cuales pueden ser controlados desde el sistema de cómputo de la caseta de operaciones, este tablero de control contiene:
 - Sistema de seguimiento solar para conocer el abasto de energía solar.
 - Manipulación de la alimentación
 - Paro de emergencia
 - Control de prensa
 - Manipulación del sistema de tratamiento de lodos
 - Sistema de manejo de válvulas dentro de la planta

Todos los equipos que operan en la planta, así como las corrientes señaladas en el DFP se encuentran especificados en el Anexo 4.

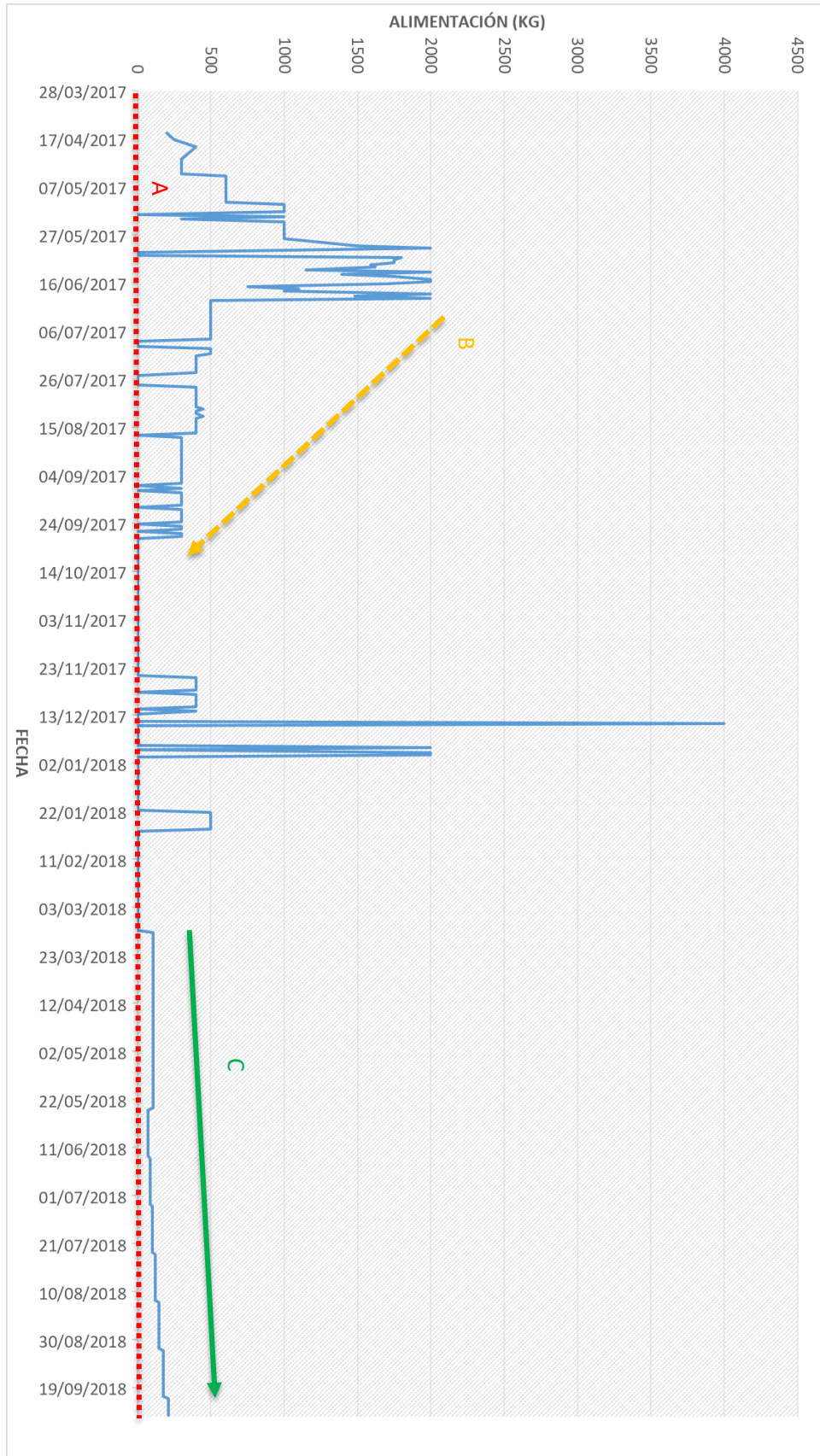
El día 29 de marzo del año 2017 se alimentaron 70 m³ de inóculo al digestor, estimando que la alimentación iniciaría con 450 kg de residuos orgánicos.

El arranque tomó alrededor de tres meses, durante los cuales las bacterias presentes en el inóculo llegaron a cierto nivel de estabilidad. A partir del 27 de junio del 2017 la planta comenzó a generar biogás con un porcentaje de metano de 51 %, con una alimentación de 1000 kg de materia orgánica, sin embargo, esta alimentación aún se encontraba por debajo de las condiciones de diseño. A lo largo de los siguientes tres meses la planta continuó en operación con una alimentación menor a la de diseño debido a la mala recepción de las bacterias del proceso a las condiciones del mismo.

A continuación, se presenta la evolución del proceso durante el año 2017 y principios del 2018, se hizo un análisis de las condiciones de operación previas y

cómo éstas pudieron llevar a que la planta tuviera fallas y no se lograra llegar a su capacidad de diseño.

En la Gráfica 1, se presenta la alimentación de la planta a lo largo de su operación.



Gráfica 1 Alimentación de la planta con respecto al tiempo de operación

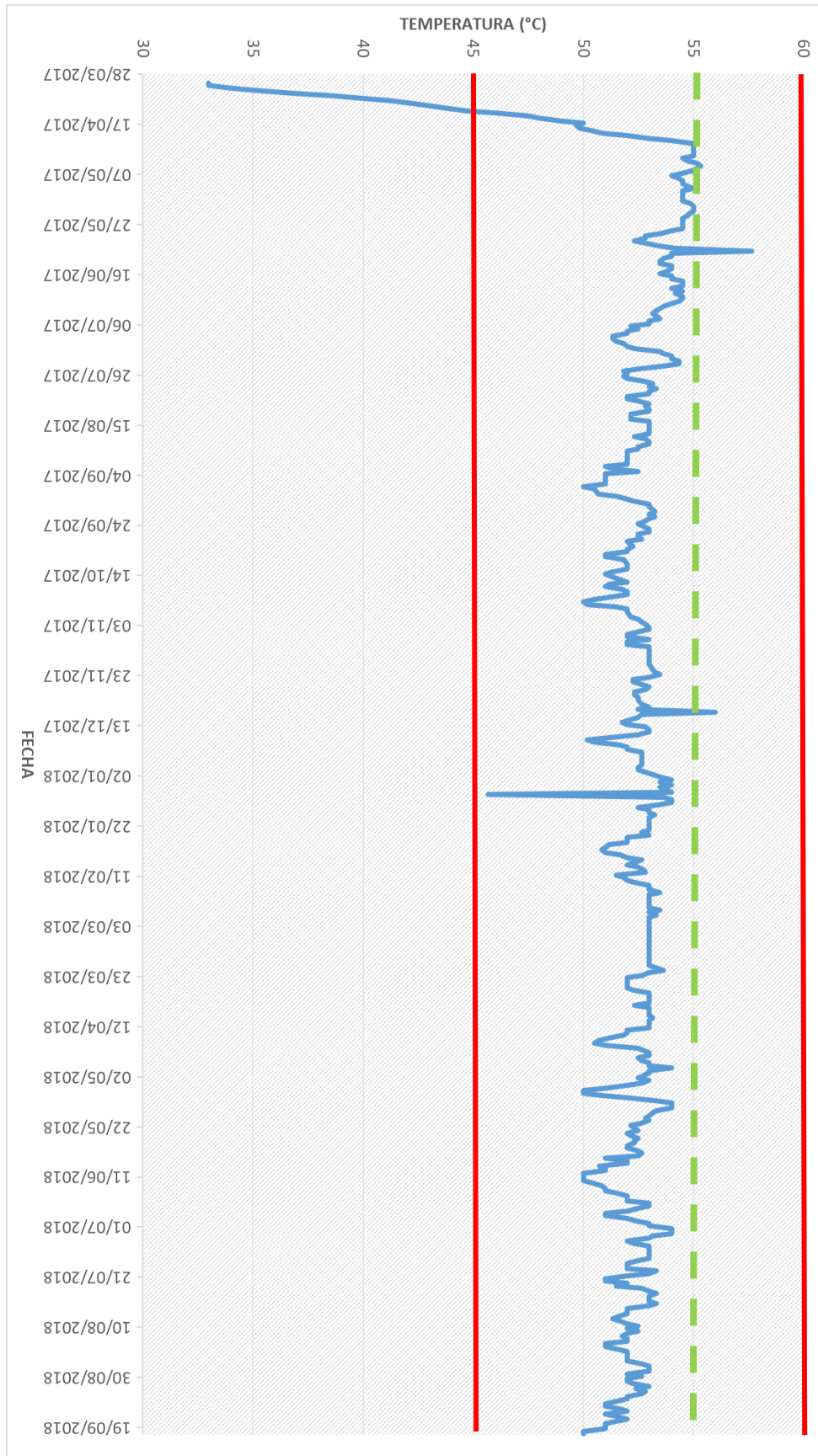
Fuente: Generación propia

La Gráfica 1 presenta tres líneas (A, B, C) las cuales muestran diferentes comportamientos que ha tenido la planta MBio. Durante la operación de la planta se alcanzó la línea A en diversas ocasiones, esta línea se encuentra sobre el eje horizontal y, por lo tanto, implica que en estos puntos no hubo alimentación a la planta. Al ser un proceso semi-continuo, es indispensable mantener una alimentación constante, ya que variaciones tan importantes como las presentes en la gráfica 1 generan variaciones en la cantidad de nutrientes presentes en la planta y, por ende, una posible inhibición de los microorganismos que participan en el proceso.

La flecha con la etiqueta B muestra cómo la alimentación de la planta disminuyó con el paso del tiempo, decisión que se tomó al presentarse un exceso de alimentación mismo que llevó a un cambio en el pH y pudo haber provocado fallas importantes en el sistema. Además de la falta de regularidad en el abasto de residuos orgánicos.

Por último, la línea C representa los últimos meses de operación tiempo en el que se desarrolló este trabajo, en este periodo se ha tenido una alimentación mucho menor que las anteriores, pero más controlada. Estas es una de las medidas que se han implementaron en el proceso debido a este proyecto y que se desarrollan más a fondo posteriormente.

El segundo parámetro de operación que se presenta es la temperatura del proceso. Se ha mencionado anteriormente que el proceso de degradación de residuos es de tipo “termofílico” por lo que es necesario mantener altas temperaturas en el sistema. En la gráfica 2 se presenta el comportamiento de la temperatura a lo largo de la operación de la planta, marcando con líneas punteadas el rango de operación óptimo para un proceso termofílico.



Gráfica 2 Tendencia de la temperatura de operación con respecto al tiempo

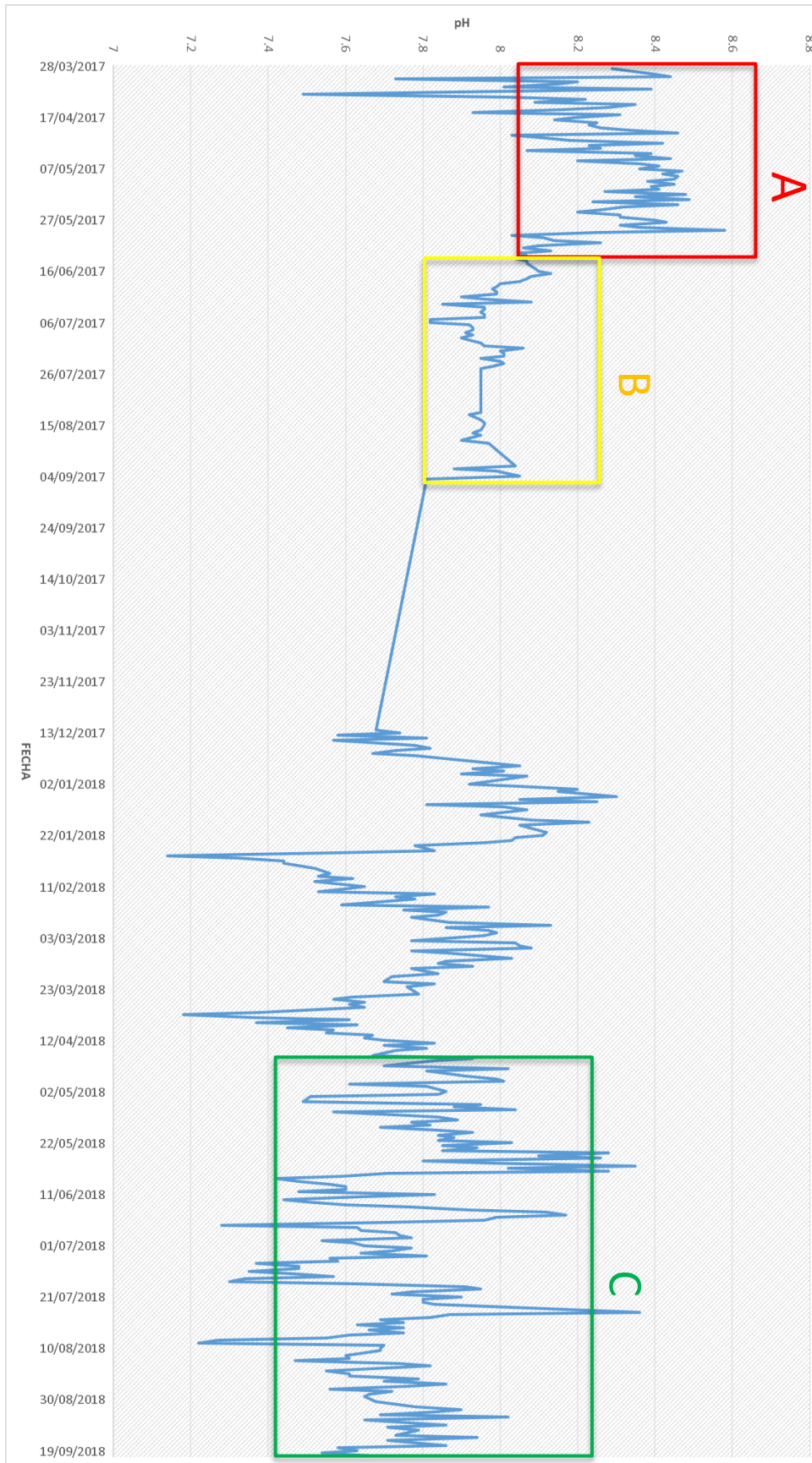
Fuente: Generación propia

En la gráfica anterior se observa que la temperatura se ha mantenido constante en valores cercanos a los 55 °C, lo cual señala que el proceso está en el rango establecido para un proceso termofílico.

A pesar de haber mantenido la temperatura del proceso constante, esto no ha sido gracias al biogás producto de la digestión como se tenía contemplado para el sistema de cogeneración, debido a que no se ha llegado a una alimentación que genere un volumen de biogás aprovechable. Los colectores solares de la planta que funcionan para calentar el agua del serpentín en el reactor únicamente funcionan en un periodo de 10:00 A.M. a 17:00 P.M. y, debido a que el proceso es continuo, el resto del día el agua es calentada gracias al gas LP alimentado al sistema.

Pensando en un balance energético, actualmente el proceso requiere más energía de la que está generando, lo cual provoca mayores gastos de operación que de ser constantes harían el proyecto inviable.

El tercer parámetro analizado fue el potencial de hidrógeno pH, dentro del sistema. Este es crítico para el proceso, ya que variaciones importantes pueden inhibir a las bacterias responsables de la digestión o incluso llegar a matarlas si se alcanzan valores muy bajos o muy altos dentro del sistema. En la gráfica 3 se presenta el comportamiento del pH con respecto al tiempo de operación.

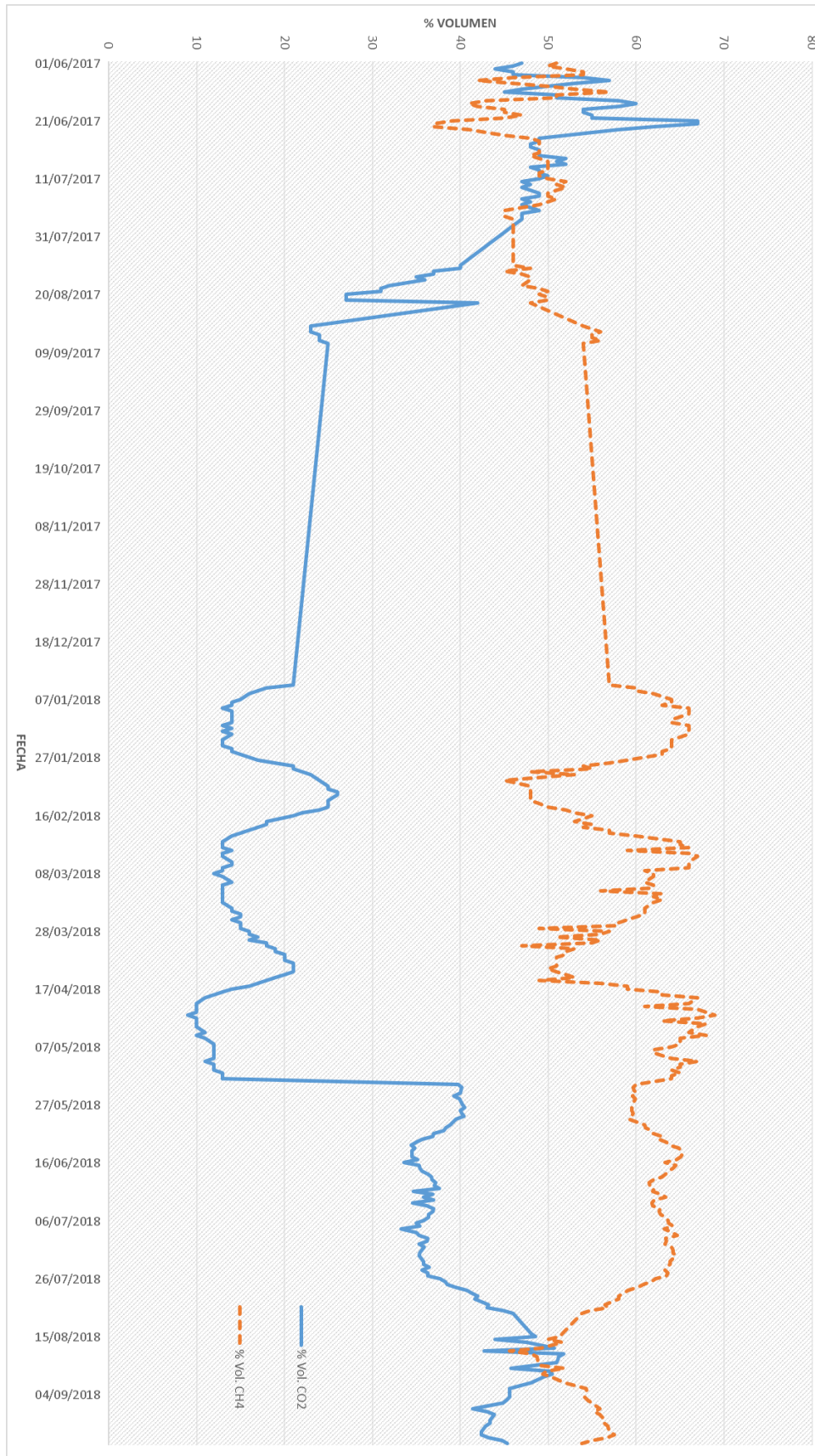


Gráfica 3 Tendencia del pH con respecto al tiempo

Fuente: Generación propia

Al comenzar su operación la planta presentó niveles de pH altos (zona "A"), posteriormente con los problemas de alimentación éste fue bajando a niveles más cercanos a la neutralidad (zona "B"). Actualmente, el proceso se ha mantenido con valores de pH más cercanos a los reportados para un proceso óptimo (Varnero, 2011), lo cual significa que el sistema es más estable. A pesar de que en la zona "C" se puede notar que hay una mayor variación en el pH, esto se explica por la etapa que está atravesando el proceso: durante la estabilización existen más variaciones en busca de cierto nivel de estabilidad, si bien existen variaciones, estas no se dan de manera tan abrupta y se han mantenido estables.

Finalmente, en la gráfica 4 se puede ver cómo el porcentaje de metano en el biogás ha aumentado con respecto al tiempo de operación, manteniéndose en los parámetros esperados de concentración, entre 55-70 % volumen para el metano y 30-50 % volumen para el dióxido de carbono (Acosta & Abreu, 2005).



Gráfica 4 Composición del biogás con respecto al tiempo

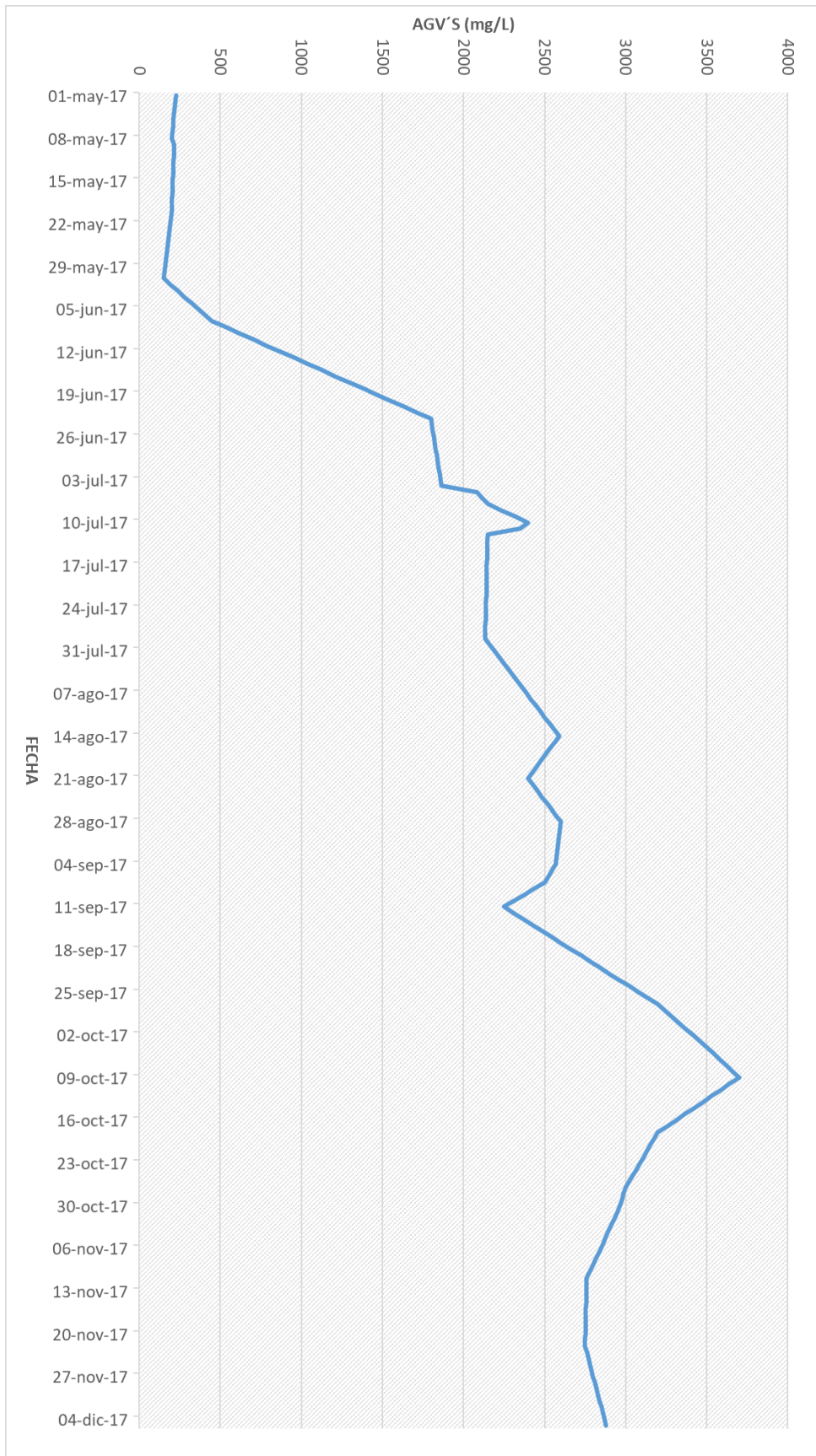
Fuente: Generación propia.

Como se puede ver en las gráficas anteriores, la planta presentó problemas de operación desde finales del 2017, por lo que se decidió disminuir la alimentación de residuos orgánicos hasta la cantidad de 100 kg diarios para así mejorar las condiciones del digestor y la evolución de los microorganismos, así como la vinculación con los productores y las causas de las fallas que provocaron el mal funcionamiento.

La temperatura del digestor se mantuvo constante y nunca salió de los límites establecidos, por lo que se descartó como principal causa de la inhibición de los microorganismos.

Una de las causas principales de la inhibición, fue la presencia de Ácidos Grasos Volátiles en exceso dentro del digestor, los cuales pueden llevar a la acidificación del proceso (Machado et al., 2012).

En la gráfica 5 se pueden apreciar los niveles de Ácidos Grasos Volátiles en el proceso y se puede ver cómo su aumento fue proporcional a las fallas en el proceso y el mal funcionamiento de la planta.



Gráfica 5 Ácidos grasos volátiles presentes en el proceso.

Fuente: Generación propia.

Como se mencionó antes, otro de los factores que afectó de manera significativa la estabilidad del proceso fue la manera en la que se llevó a cabo la alimentación. No se logró mantener una cantidad constante de residuos alimentados al biodigestor, y esto provocó variaciones en la materia degradada contribuyendo al desequilibrio del sistema.

Al ser un proyecto en conjunto con la entonces delegación Milpa Alta, la Secretaría de Ciencia y Tecnología e Innovación de la CDMX así como con los productores de nopal del CANV, la operación correcta de la planta no solo depende de factores técnicos, sino de factores sociales.

Otro factor social que ha afectado la operación de la planta es el acercamiento que se tiene con los productores de nopal. Es crítico para la operación que exista una difusión sobre el funcionamiento y las necesidades de la planta, ya que en caso de que el proyecto sea mal difundido con ellos, este puede llegar a ser considerado inútil para las personas e incluso puede llegar a ser considerado como un riesgo para la población cercana a la planta. Al depender del abasto de residuos que generan estos productores, es necesario tener una divulgación consciente sobre cómo esta planta es benéfica tanto para SUEMA como para los productores y para la operación del mismo mercado.

7. Propuesta para llevar a equilibrio el proceso

A partir del mes de marzo del 2018 se comenzó con una nueva propuesta para el proceso de alimentación de residuos orgánicos buscando llegar al equilibrio químico del sistema y, dependiendo del comportamiento del sistema, acercarse a la alimentación de diseño. Se hizo una re-inoculación a los residuos orgánicos de nopal, con el fin de propiciar los procesos metabólicos de las bacterias encargadas de la digestión y así estas crecieran de mejor manera.

Posteriormente, a partir del 27 de mayo, se comenzó a alimentar únicamente con residuos orgánicos, empezando con 70 kg diarios y con un aumento controlado de un 20% cada 20 días.

Esta alimentación se decidió tomando en cuenta la disponibilidad de los residuos que se tenían en la planta y el hecho de que una reducida cantidad de residuos

inicial permitiría que el proceso no presentara grandes cambios. De esta forma se evitó tener problemas de sobre carga en la alimentación como se tuvieron en el pasado. Sin embargo, un aumento tan bajo implicaba que la alimentación de diseño sería alcanzada en un tiempo mayor a un año, cuando se ha encontrado que, a pesar de ser lento, el proceso de llevar la planta a un estado estable requiere de algunas semanas o meses (Morales Rojo, 2005) dependiendo del crecimiento de las bacterias dentro del sistema.

Para lograr llevar el proceso a equilibrio es necesario un seguimiento de los factores fisicoquímicos y actuar en consecuencia en caso de que se presenten problemas como la acidificación del sistema o cambios importantes en el contenido de metano en el gas. A continuación, se detalla lo que se hizo a lo largo de estos meses como parte de este proyecto.

7.1. Abasto controlado de residuos

Como se mencionó anteriormente, uno de los problemas que se presentaron en la etapa de arranque de la planta fue la falta de residuos para hacer la alimentación de la planta. Esto debido a la poca organización y falta de mecanismos eficientes para que los productores de nopal fueran conscientes de las necesidades de la planta.

Pensando en esto se propuso junto con la administración del CANV, que tanto los productores como la dirección del centro entregarán los residuos necesarios a la planta dependiendo de las necesidades de la misma.

Para poder informar a los productores sobre la cantidad de residuos necesarios de la planta se propuso un calendario informativo con los requerimientos diarios de residuos para mantener la alimentación constante y que así los productores puedan estar al tanto de los residuos requeridos y no se llegue a un sobre abasto.

Agosto 2018

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	CAJAS 17 18	CAJAS 17 19
CAJAS 17 20	CAJAS 17 21	CAJAS 17 22	CAJAS 17 23	CAJAS 30 24	CAJAS 30 25	CAJAS 30 26
CAJAS 30 27	CAJAS 30 28	CAJAS 30 29	CAJAS 30 30	CAJAS 30 31		

OBJETIVO DEL DÍA

Figura 11 Propuesta de calendario informativo para el abasto de RO
Fuente: Generación propia.



Figura 12 Entrada del CANV donde se presentaría el calendario
Fuente: Generación propia.

Estas medidas fueron aceptadas por ambas partes y serán iniciadas en cuanto la alcaldía y SUEMA® lleguen a un acuerdo sobre la futura operación de la planta.

7.2. Seguimiento del proceso

El seguimiento del proceso consistió no solo en llevar el registro de parámetros de operación de la planta como lo son temperatura, presión y alimentación, sino que, además, diariamente se hizo el registro del pH de los lodos dentro del reactor utilizando un multímetro y se registró la composición del gas de salida del reactor con un medidor de componentes de gas. Se determinó el parámetro alfa, con el cual se determina la capacidad “buffer” de los lodos dentro del reactor dos veces a la semana, se hizo una determinación de sólidos (ST, SV y SF) en los lodos.

Con este seguimiento se esperaba determinar si sería posible hacer un aumento en la alimentación de manera más rápida y, además, para tener un mejor control del proceso.

7.3. Metodología experimental

Los análisis de laboratorio se hicieron de acuerdo al “Manual de técnicas de laboratorio de MBIO” el cuál, a su vez, se basa en el manual de métodos para el análisis de aguas residuales de la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency, 1999). Estos análisis se realizaron en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Milpa Alta, donde se tiene una vinculación permanente a través de la I.B.Q. Joaquina Villegas Castillo, jefa de los laboratorios de ciencias en el instituto.

Las muestras tanto del digestato, como de los residuos de nopal triturados se guardaron en recipientes de polietileno de 120 mL evitando dejar headspace en los contenedores. Posteriormente fueron transportados dentro de una hielera hasta el laboratorio del Instituto.

Las muestras de los residuos de nopal se tomaron del contenedor TA-150, equipo donde se almacenan los residuos triturados, de esta muestra únicamente se determinó su pH y su contenido de sólidos, ya que con esto se verificó el pH de entrada al sistema y se calculó la generación esperada de biogás. El digestato se obtuvo directamente del reactor RB-200.

7.3.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)

Esta es la primera variable que se debe controlar en el proceso ya que es la que más problemas genera en caso de no ser regulada. Para que se lleve a cabo la digestión anaerobia el pH debe mantenerse en valores cercanos a la neutralidad, ya que a niveles muy bajos se presentan problemas con las bacterias metanogénicas, mientras que niveles muy altos se puede influir en el equilibrio químico amonio-amoniaco, un inhibidor de la fase metanogénica.

Esta determinación es una diferencia entre el potencial generado en un electrodo del multímetro y un electrodo de referencia.

Para esta medición, el equipo se calibró con tres soluciones de referencia con un pH conocido con valores de 4, 7 y 10 unidades respectivamente. El equipo de medición fue enjuagado con agua destilada, cada vez que se cambiaba de solución y, posterior a su calibración y enjuague, el electrodo del multímetro se introducía en una muestra de 50 mL de la muestra que se tenía, tanto de digestato del reactor, como de residuos orgánicos que serían alimentados al proceso.



Figura 13 Equipo para la medición del pH

7.3.2. Determinación del parámetro alfa (α)

El parámetro alfa sirve para valorar la capacidad *buffer*⁴ del sistema, así como su estabilidad. La capacidad *buffer* o amortiguadora del sistema indica la capacidad del sistema para resistir y contrarrestar los cambios de pH cuando aumenta la concentración de ácidos. Se basa en la reacción entre los iones (OH^-) resultado de la disociación de los solutos presentes en la mezcla con los residuos orgánicos alimentados al sistema que presentan un pH ácido.

Para este análisis se realiza una titulación de 25 mL de muestra de digestato con una disolución de ácido sulfúrico 0.2 N. Se titula la muestra hasta alcanzar un pH de 5.75 (V1) correspondiente a la alcalinidad bicarbonática y se continúa la titulación hasta alcanzar un pH de 4.3 (V2) correspondiente a la alcalinidad de los ácidos grasos volátiles (AGV's). Finalmente, la alcalinidad total se calcula como el cociente de la alcalinidad debido a los bicarbonatos entre la alcalinidad total mediante la expresión:

$$\alpha = \frac{V1}{V1 + V2}$$

Ecuación 1 Relación de alcalinidad

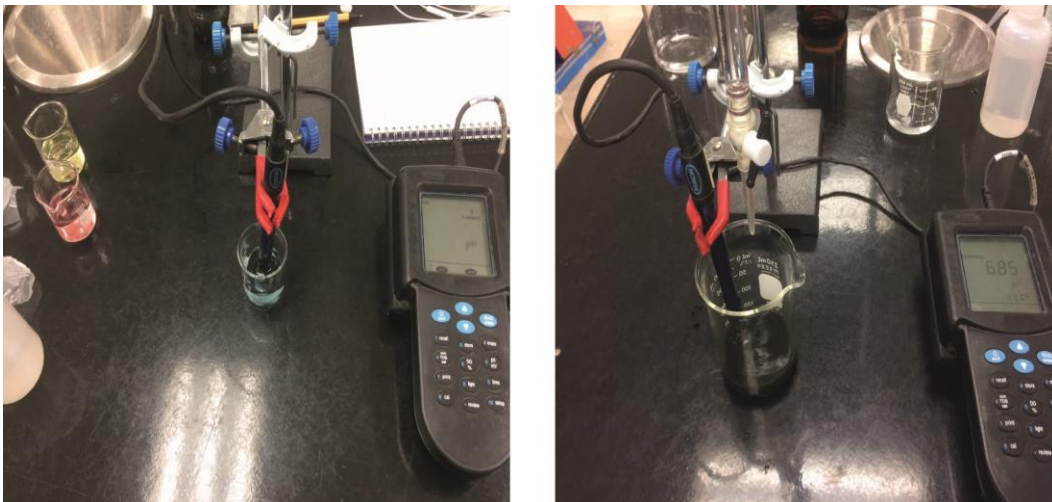


Figura 14 A) Calibración del equipo de medición de pH B) Medición del parámetro alfa de los lodos de digestión

⁴ Buffer: Mezcla en concentraciones relativamente elevadas de un ácido y su base conjugada con la propiedad de mantener estable el pH de una disolución frente a la adición de ácidos o bases fuertes.

7.3.3. Determinación de sólidos

La determinación de sólidos en el sistema es útil para indagar las cantidades de materia orgánica que pueden ser degradadas por el sistema. Los sólidos totales (STT) corresponden a la cantidad de sustrato alimentado al sistema de degradación, incluyendo tanto a la fracción orgánica como a la inorgánica. Los sólidos volátiles totales (STV) corresponden a la materia orgánica presente en el sistema que es susceptible a la degradación por acción de los microorganismos presentes en el sistema. Finalmente, los sólidos totales fijos (STF) corresponden a la fracción inorgánica no degradable presente en el sistema.

La metodología empleada para la determinación de sólidos fue mediante gravimetría. Las muestras de digestato y RO alimentados fueron secados en crisoles de porcelana durante dos horas en un horno a 100 °C. Posteriormente los crisoles fueron pesados e introducidos a una mufla precalentada a 500 °C los sólidos remanentes se pesaron y registran. El registro de masas permite hacerlos cálculos para la determinación de Sólidos totales (STT), sólidos volátiles totales (STV) y sólidos fijos totales (STF).

Para los cálculos se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$A) \% \text{ sólidos totales} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} * (100)$$

$$B) \frac{mg \text{ ST}}{kg \text{ muestra}} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} * (1000)(1000)$$

$$C) \% \text{ sólidos totales} = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} * (100)$$

$$D) \frac{mg \text{ ST}}{kg \text{ muestra}} = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} * (1000)(1000)$$

$$E) \% \text{ sólidos totales} = \frac{P_4 - P_1}{P_3 - P_1} * (100)$$

$$F) \frac{mg \text{ ST}}{kg \text{ muestra}} = \frac{P_4 - P_1}{P_3 - P_1} * (1000)(1000)$$

Ecuación 2 A) % de Sólidos Totales, B) mg de Sólidos Totales por kg de muestra c) % de Sólidos Volátiles, d) mg de Sólidos Totales Volátiles por kg de muestra, e) % de Sólidos Fijos, f) mg de Sólidos Totales Fijos por kg de muestra

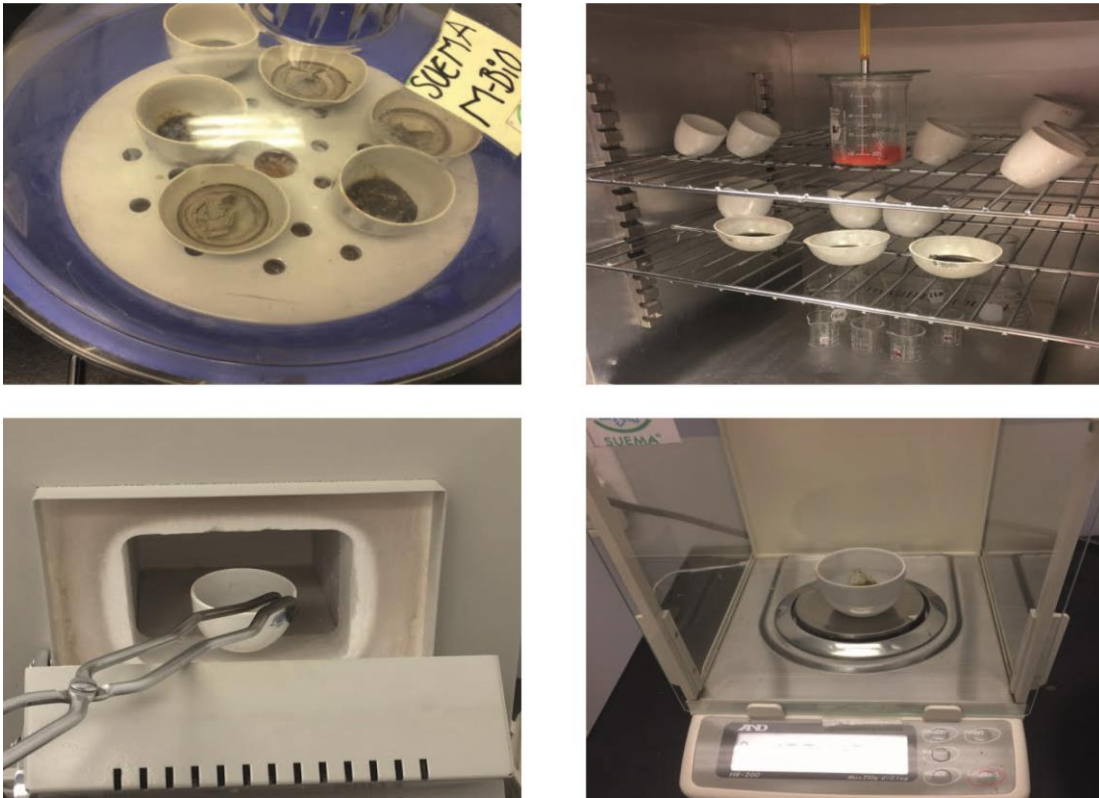


Figura 15 A) Toma de muestras B) Calentamiento C) Incinerado D) Pesado

7.3.4. Medición de los componentes del biogás

Cada día se verificaba la composición del biogás producido dentro del reactor utilizando un medidor de gas LANDTEC. Cuando se presentaban variaciones atípicas, se revisaban los resultados junto con los de las pruebas fisicoquímicas para verificar el correcto funcionamiento del proceso completo.

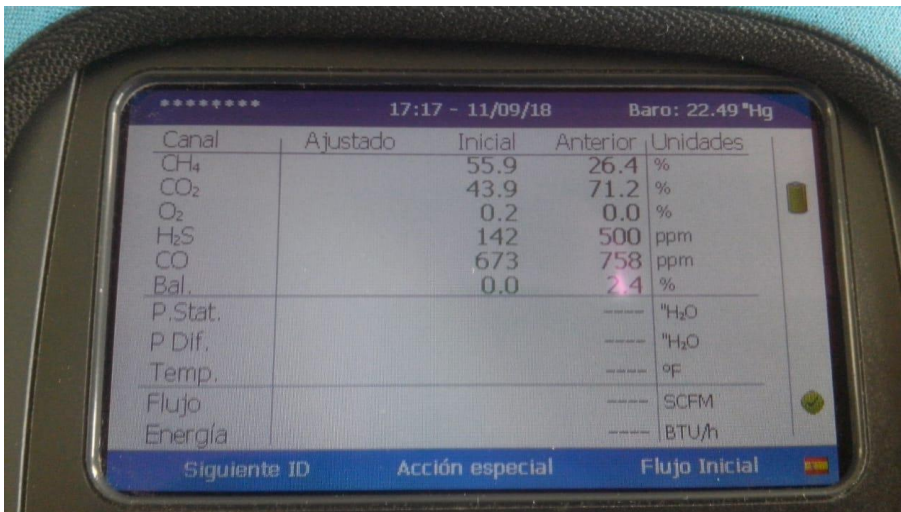


Figura 16 Medición de los componentes del biogás

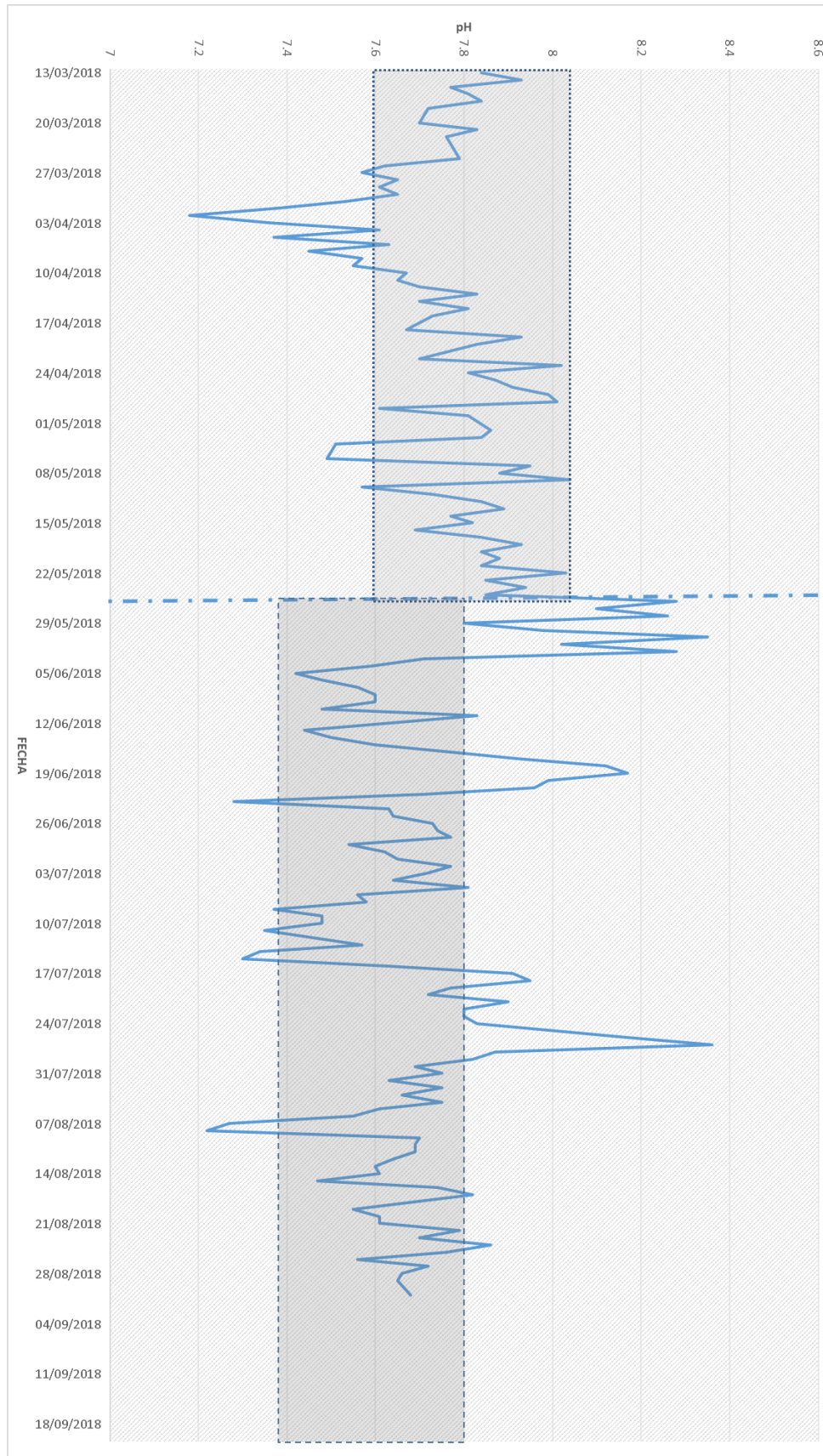
8. Resultados

Se hizo el seguimiento de las variables de proceso (pH y composición del biogás) al inicio de esta propuesta de alimentación, posteriormente al corroborar que el sistema respondía de la manera esperada se comenzó con los análisis del parámetro alfa y determinación de sólidos en el digestato durante el mes de julio.

8.1. Determinación del potencial de hidrógeno (pH)

En la gráfica 6 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones diarias del potencial de hidrógeno en el reactor, con un pH promedio igual a 7.72. El valor esperado de pH debía ser cercano la neutralidad. Como se mencionó previamente, las variaciones en éste parámetro perturba la población de bacterias y afectar al proceso completo.

Se puede identificar que, el 26 de mayo (línea vertical punteada) al cambiar la alimentación a únicamente materia orgánica, el pH del sistema comenzó a disminuir, pasando de un rango promedio de entre 7.6-8 a un rango inferior de 7.4-7.8. Los cambios se dieron de la manera esperada, y los valores no llegaron a niveles muy bajos, sino que, al contrario, el pH se mantuvo un poco alto para un sistema de biodigestión anaerobio.



Gráfica 6 Comportamiento del ph con respecto al tiempo

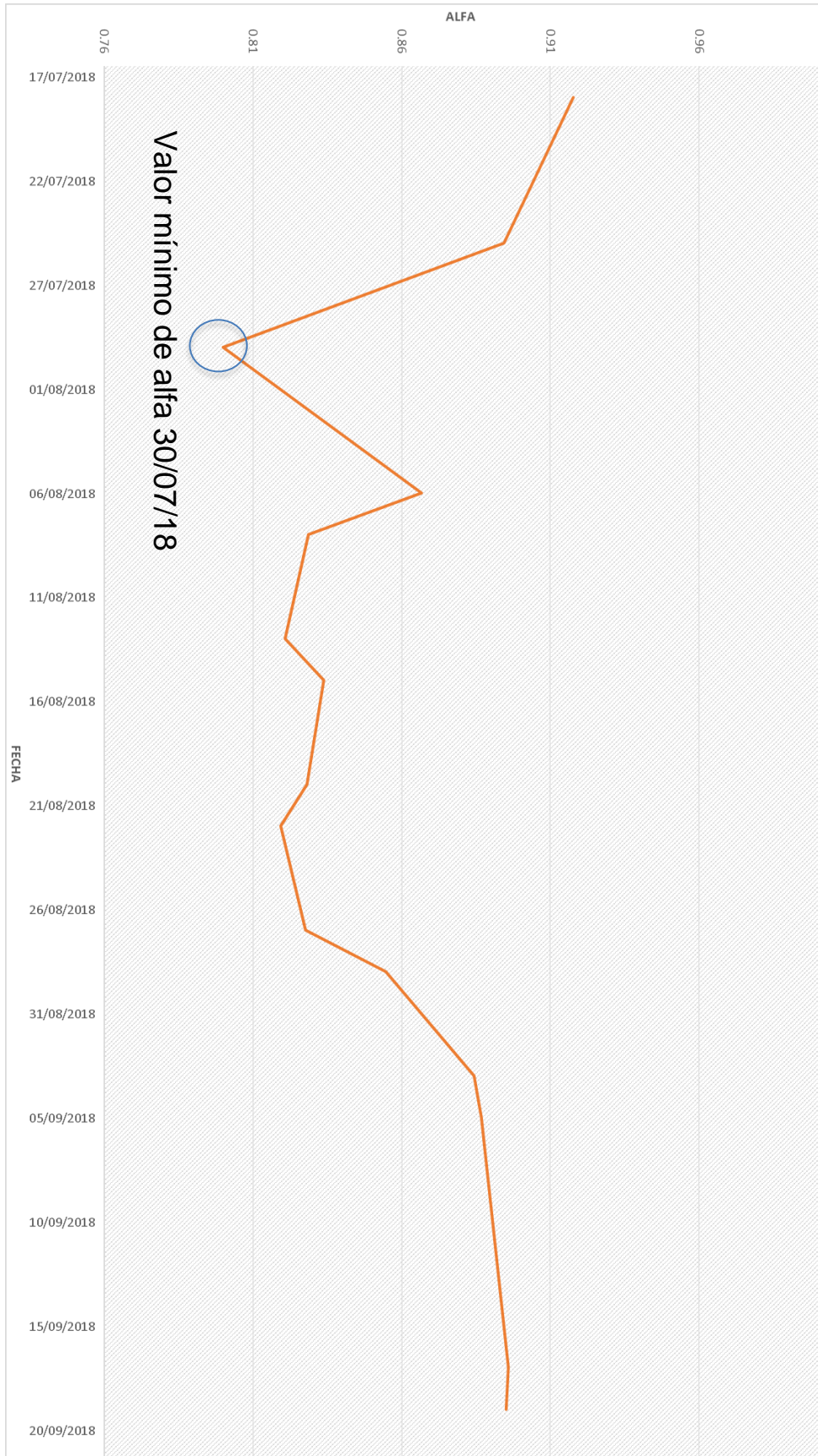
Fuente: Generación propia.

En el caso de los residuos triturados alimentados al reactor, solo se realizó el análisis en un periodo corto del proyecto debido a que ya se tenían los datos de la caracterización de los mismos y con esto se verificó el pH de entrada al sistema. Los resultados de las pruebas realizadas dieron un pH promedio de 4.64 lo cual es 0.6 unidades más alto que el reportado en la caracterización.

8.2. Determinación del parámetro alfa (α)

La relación de alcalinidades o parámetro alfa (α) para el digestato mantuvo niveles altos con un valor promedio de 0.85 lo que indica estabilidad en el proceso y dentro del reactor. En general un valor de alfa cercano a la unidad indica mayor estabilidad y la posibilidad de que el sistema soporte mayores cargas orgánicas.

En la gráfica 7 se puede ver cómo α llegó a un mínimo de 0.8 el 30 de julio, pero este valor aún se encuentra dentro de la estabilidad por lo que no generó ningún problema. A lo largo del trabajo realizado el factor alfa dejó ver que los aumentos de carga podrían haber sido mayores a sólo el 20% del peso como se tenía contemplado. Incluso, dicha carga presentó problemas al final ya que, en el cuarto aumento de alimentación al llegar a 120.9 kg/día se detectó que no se contaba con suficientes proteínas en el sistema para que los microorganismos consumieran. Esto se vio reflejado en la composición de salida del biogás (gráfica 9). Además, durante este periodo también se puede notar un aumento en el valor de alfa lo que indica que el sistema puede recibir una mayor carga de alimentación.



Gráfica 7 Seguimiento de alfa con respecto al tiempo

Fuente: Generación propia.

8.3. Determinación de sólidos

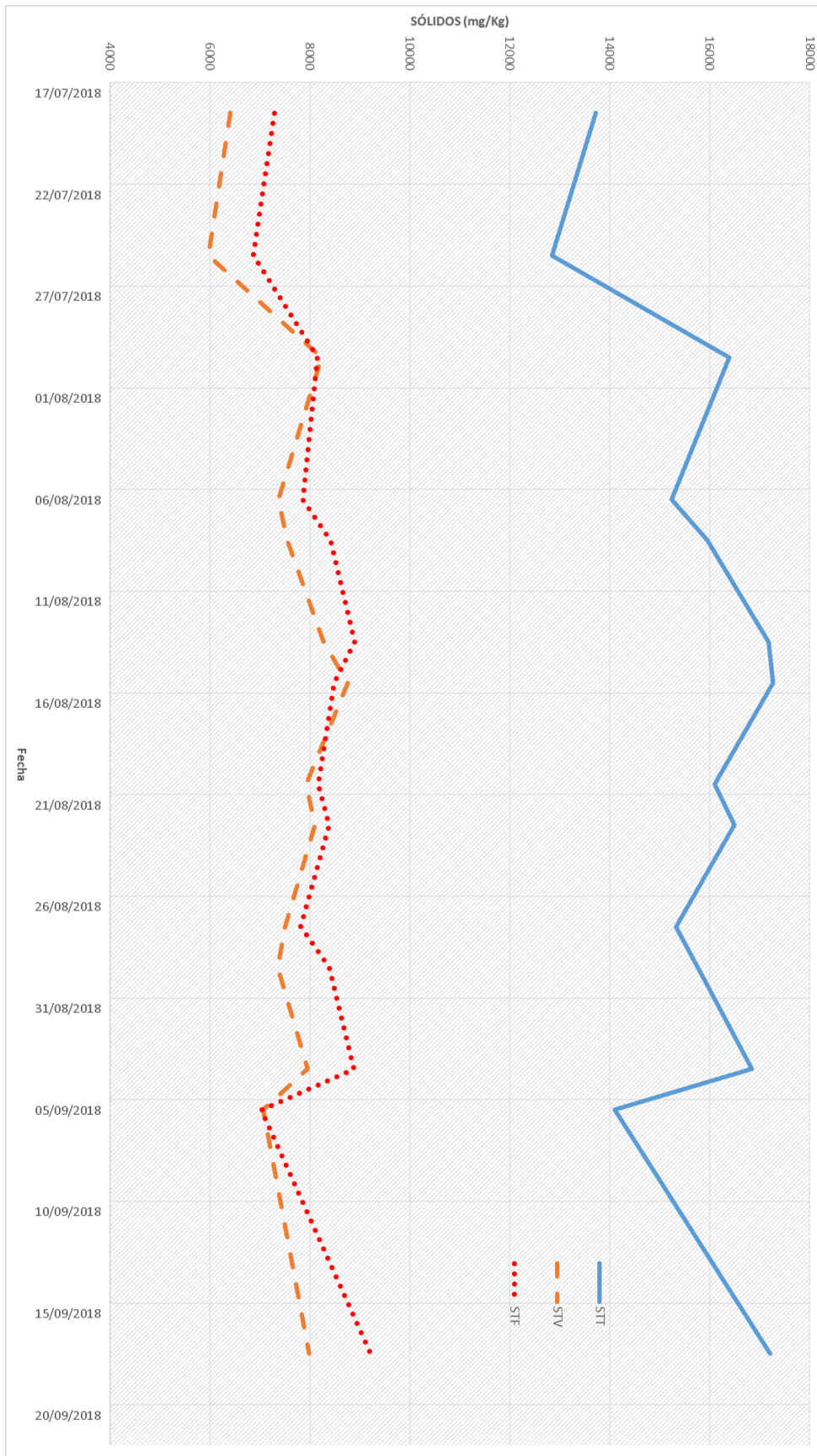
La gráfica 8 muestra el comportamiento de los STT, STV y STF en el digestato a lo largo del periodo de seguimiento del proceso. Se obtuvo un valor promedio de 15528.59 mg/kg para los sólidos totales, 7331.25 mg/kg para los sólidos totales volátiles y de 8197.34 mg/kg para los sólidos totales fijos. Aquí se puede ver un comportamiento relativamente constante, salvo durante el periodo a partir del 27 de agosto cuando se presentó una disminución para los tres diferentes parámetros de sólidos. Lo anterior refleja una menor cantidad de materia que puede ser degradada por lo que se puede explicar la disminución en el metano presente en el biogás al tener una correlación directa entre los sólidos volátiles removidos y la producción de biogás.

De igual manera se determinaron los sólidos presentes en los residuos de alimentación para tener un promedio con el cuál hacer el cálculo de producción de biogás dependiendo de los gramos de sólidos volátiles retirados de la alimentación, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 9 sólidos presentes en los RO

SÓLIDOS PRESENTES EN LA ALIMENTACIÓN (mg/kg)	
Promedio ST	53405.24
Promedio STV	39998.81
Promedio STF	13406.42

Fuente: Generación propia.

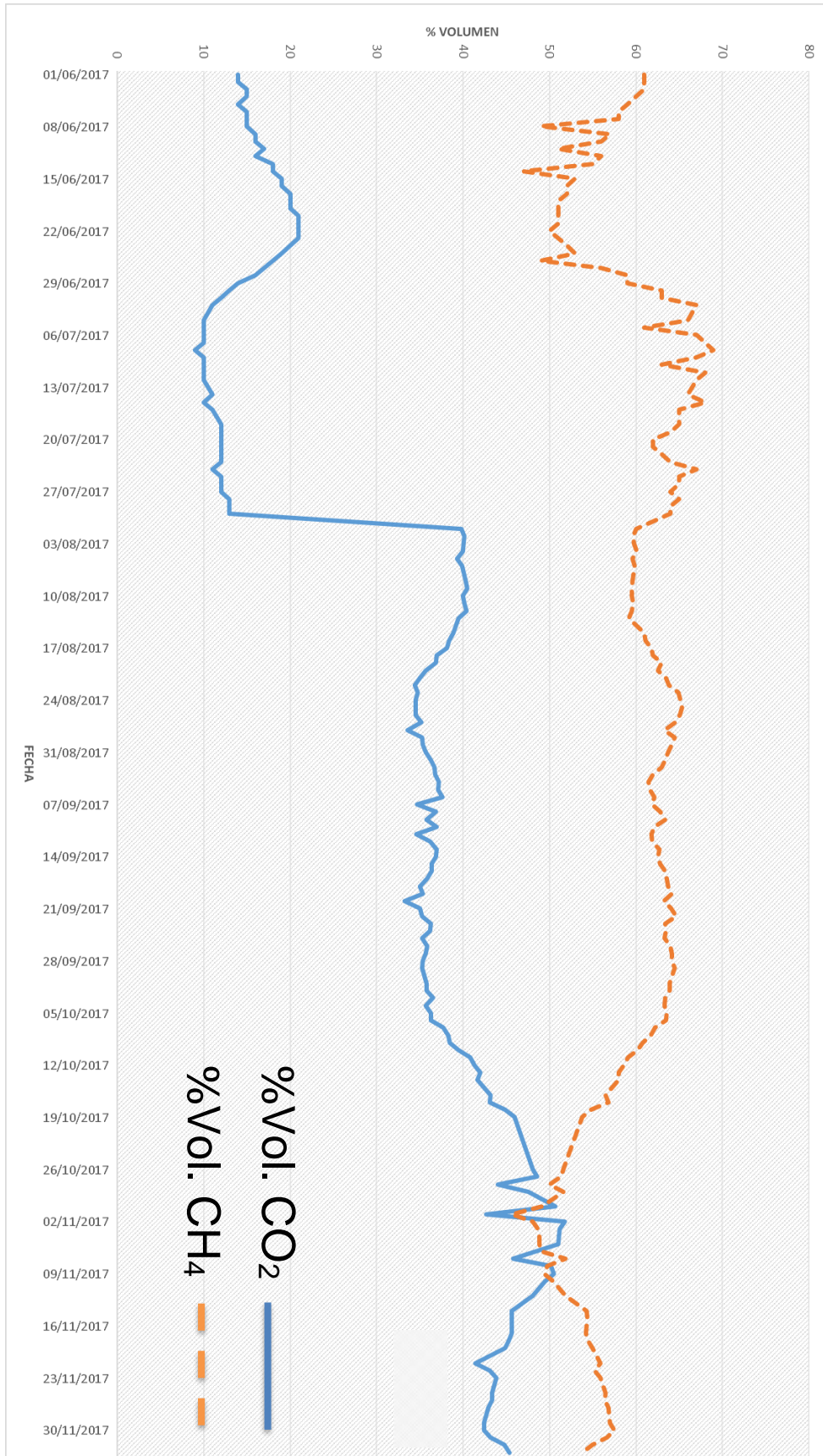


Gráfica 8 Sólidos en el Digestato con Respecto al Tiempo

Fuente: Generación propia.

8.4. Medición de componentes del biogás

Desde que se comenzó con la propuesta de alimentación se hizo un seguimiento de la composición del biogás producido, esto con el fin de corroborar que las bacterias en el sistema trabajaran de manera correcta y en las cantidades reportadas para un biogás promedio (Kiss et al., n.d.). La gráfica 9 muestra cómo durante la alimentación con la re-inoculación de los residuos orgánicos, la producción de gas tenía un comportamiento sumamente variable, con una composición mínima de CO₂ de cerca del 20% volumen. Posteriormente al comenzar a alimentar únicamente residuos orgánicos, la composición se estabilizó llegando a un promedio de 62.4% vol. de metano y 36.89% vol. de CO₂ durante un periodo de 2 meses desde el 5 de junio hasta el 22 de junio, donde el metano presente en el gas comenzó a disminuir en 1% diariamente hasta un valor mínimo de 45.6% vol. Esta disminución empata con los resultados tanto del parámetro alfa cuando este comenzó a aumentar como los de los sólidos presentes en el digestato, donde se dio una disminución de los parámetros analizados.



Gráfica 9 Composición del biogás a lo largo del tiempo

Fuente: Generación propia.

8.5. Producción estimada de biogás

Debido a la baja alimentación que se manejó durante este proceso, la producción de biogás fue mínima por lo que este fue quemado en la antorcha (ANT-550) y no fue aprovechado como combustible. Debido a la baja producción de biogás el medidor de flujo instalado no fue óptimo para hacer un seguimiento de la cantidad de biogás producida diariamente. Fue así que se optó por hacer un cálculo de la producción de biogás basado en el rendimiento utilizado para el cálculo de diseño del digestor y la cantidad de sólidos volátiles removidos de la materia orgánica.



Figura 17 Rotámetro instalado en la planta

Ecuación utilizada para el cálculo de la producción de biogás dependiendo de la cantidad de materia alimentada al proceso:

$$(STV_{alimentación} - STV_{digestato}) * m * Y = Q_{biogás}$$

Ecuación 3 Estimación de la producción diaria de biogás

Donde:

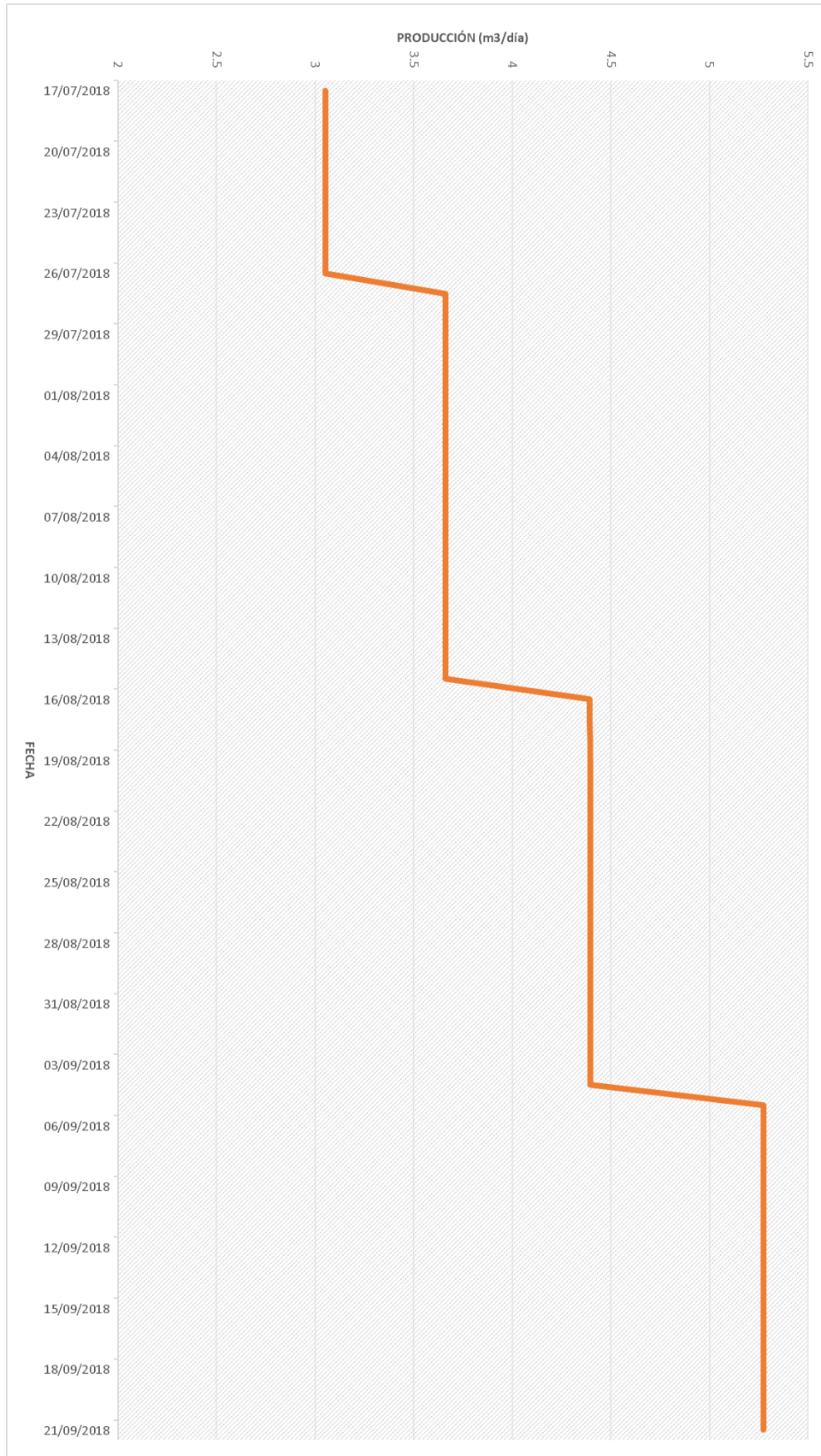
$STV_{\text{alimentación}}$ = Promedio de sólidos totales volátiles presentes en los residuos alimentados al sistema $[\frac{kg_{SV}}{kg}]$.

$STV_{\text{digestato}}$ = Promedio de sólidos totales volátiles presentes en los lodos $[\frac{kg_{SV}}{kg}]$

m = flujo másico de alimentación $[\frac{kg}{día}]$

Y = Rendimiento del biogás $[\frac{m^3}{kg_{SV}}]$

En la gráfica 10 se muestra la producción de biogás a lo largo del proceso.



Gráfica 10 Generación de biogás a lo largo del tiempo

Fuente: Generación propia.

9. Análisis de resultados

Con los resultados obtenidos de pH podemos ver como el proceso MBio tuvo un comportamiento estable a lo largo de este proyecto, con variaciones para este parámetro que se mantienen en un rango de entre 7.4 y 7.8 en su mayoría y cambios menores a 0.4 unidades diariamente. Con esto en mente se puede ver que las variaciones no llegaron a afectar el equilibrio del sistema y, al contrario, lograron mantenerse estables y continuos. El parámetro alfa del sistema junto con el pH constante son indicadores de la capacidad del sistema para recibir una mayor cantidad de residuos para su tratamiento, al mantenerse estable el pH a pesar del aumento de residuos esto indica que el sistema no se ve afectado de manera severa por estos, de igual manera alfa aumento a lo largo del seguimiento de la planta, señal de la estabilidad del sistema.

Además, los sólidos en el digestato se mantuvieron constantes a lo largo de este proyecto, por lo que el sistema mantuvo su capacidad de consumo de sólidos volátiles los cuáles son digeridos por las bacterias en el sistema y posteriormente son la materia prima para la producción de biogás. Al mantenerse constante la concentración de sólidos volátiles se puede ver que el sistema mantiene el equilibrio al mantener un consumo constante de estos. Otro factor que demuestra el buen funcionamiento del proceso son las concentraciones de metano que se alcanzaron en el biogás, incluso, se llegó a un periodo en el que el sistema disminuyó su producción de metano debido a la falta de nutrientes para su degradación, lo cual se solucionó al continuar con las cargas constantes al sistema, el cual aumentó gradualmente sus niveles de metano en el biogás.

Finalmente, la producción estimada de biogás se hizo de manera teórica con los datos de diseño de la planta y los resultados de los análisis fisicoquímicos, para tener un dato real es necesario mejorar los sistemas de medición de biogás producido o introducir análisis fisicoquímicos que permitan mejorar el cálculo de los productos. A pesar de que el rendimiento del digestor es menor a otros reportados, esto puede deberse al sistema de alimentación que tenga cada uno de estos procesos, en algunos casos la materia orgánica introducida al sistema esta mezclada con otros componentes como inóculos o mezclas de materia orgánica que

pueden beneficiar al sistema y, debido a la materia prima en la que se enfoca a tratar MBio esto podría no ser viable en este digestor.

10. Conclusiones

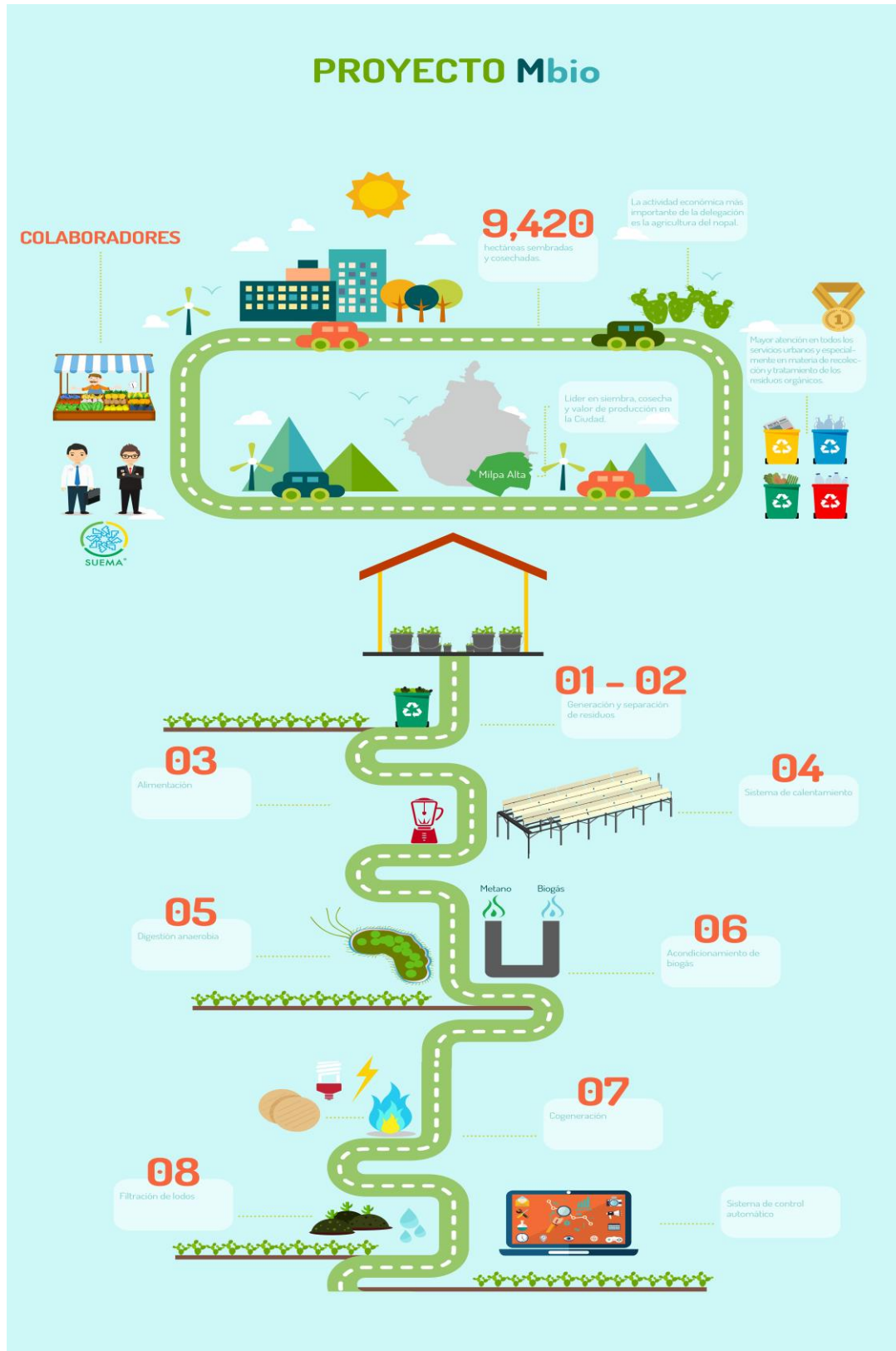
- Con el seguimiento que se hizo a lo largo de este trabajo se puede asegurar que el sistema de digestión anaerobia MBio funciona como tratamiento alternativo de residuos sólidos orgánicos en el CANV.
- La propuesta de alimentación que se trabajó con aumentos del 20% es eficiente. Incluso los aumentos podrían ser más grandes para llegar así a la alimentación de diseño en un menor tiempo si estos se hacen procurando que el pH no disminuya por debajo de 6 ya que esto implica una acidificación del sistema (Varnero, 2011).
- Fueron necesarios 36 días para tener una producción estable de biogás con una buena composición y, de acuerdo con los parámetros reportados, puede decirse que, sin problemas con las cargas orgánicas, por lo que la alimentación de diseño podría ser alcanzada en un periodo similar de tiempo. El monitoreo de la producción de biogás muestra que si se generó a un biogás dulce el cual podría ser utilizado como combustible de acuerdo al manual del biogás de la FAO (Varnero, 2011).
- Este digestor tiene un rendimiento bajo comparado con otros reportados en la literatura (Leonardo & Rodríguez, 2015) debido a que la materia utilizada es únicamente pela de nopal y no la verdura completa como en otros digestores encontrados.
- Debido al medidor de flujo de biogás que se tiene en la planta no fue posible registrar la cantidad de gas generado diariamente, es indispensable cambiar este para tener mediciones confiables. Las demás etapas de la planta funcionan de manera adecuada y con las actualizaciones realizadas en los DFP es más sencillo tener un mejor panorama del sistema instalado actualmente.
- Debido a las características del proceso (termofílico) fue necesario utilizar gas L.P. para mantener la temperatura del sistema, lo cual elevó los costos de operación. Lo anterior pudo haberse evitado con una carga mayor de residuos

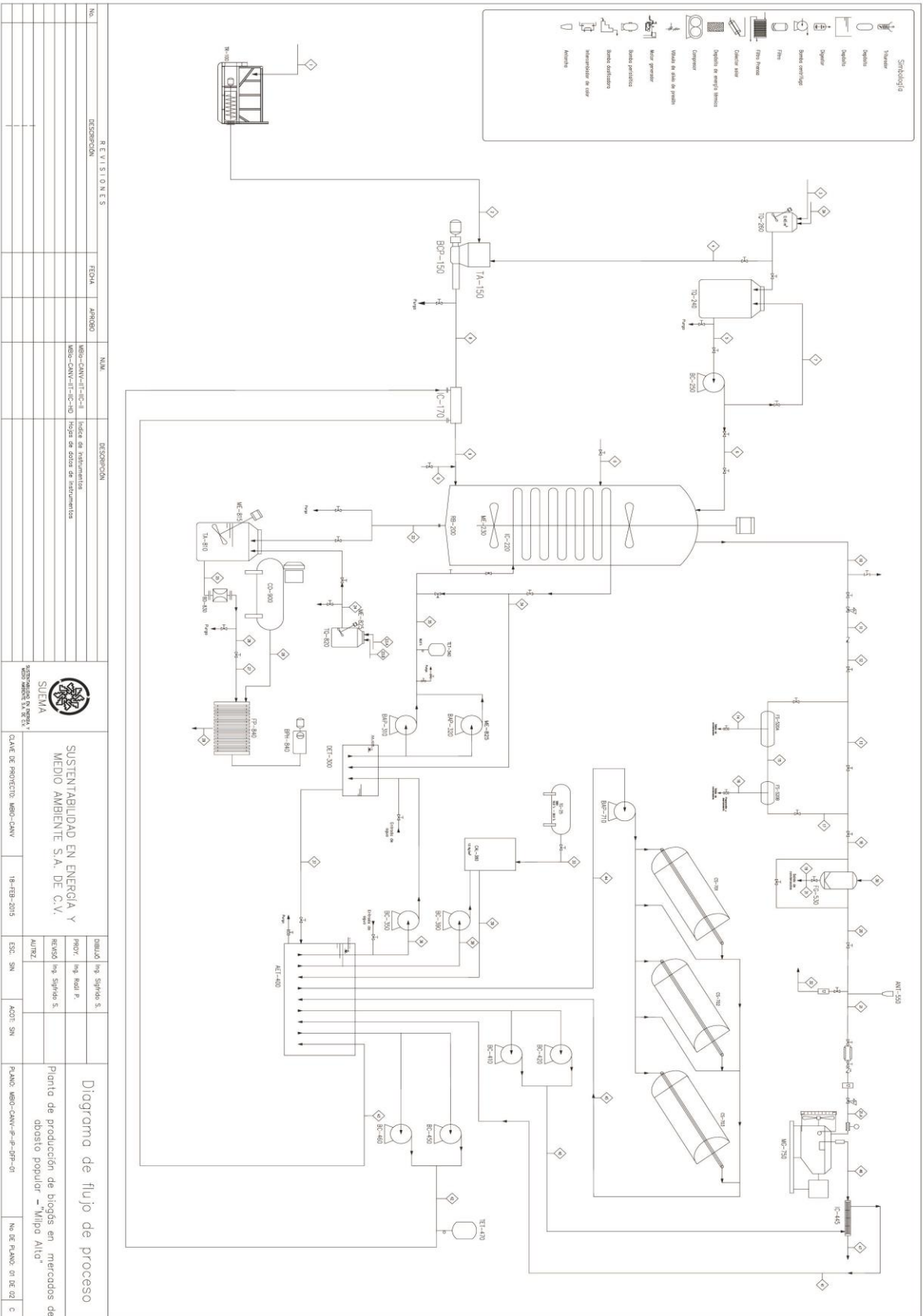
que produjera un mayor volumen de biogás utilizando de mejor manera el sistema de cogeneración.

11. Recomendaciones

- Se recomienda probar mayores cargas de materia orgánica regulando el pH con sustancias tales como CaO o NaHCO₃ los más comúnmente utilizados y reportados en la literatura (Kleyböcker et al., 2012).
- Los análisis de la demanda química de oxígeno del digestato y de la alimentación permitirán calcular, con mejor aproximación la cantidad de biogás generado durante el proceso.
- Para mejorar la confiabilidad de los registros se recomienda el cambio del medidor de flujo a la salida del reactor, sustituyendo el rotámetro analógico que se utiliza por un medidor de flujo digital con totalizador para tener registro de la producción diaria y total del biogás. De esta forma, se podrían comparar datos reales obtenidos en planta con los datos calculados con el DQO y así, corroborar la eficiencia del proceso. Por otro lado, se podrían instalar dos medidores de manera paralela con diferentes escalas para tener registros constantes sin importar la producción de biogás, habilitando el medidor de flujo correspondiente conforme a la producción teórica calculada o, como se mencionó antes, tener un mejor medidor de flujo.

12. Anexos





ANEXO 3

13. Bibliografía

- Bellesteros, S., Parga, J. R., & Rincón López, J. M. (2010). Vitrificación para inmovilizar residuos peligrosos, *Ciencia y Desarrollo*, CONACYT Ed., México. 243 (36), 6–11.
- Clemente Reyes, A., & Estradas Romero, R. (2015). Planta de Biodigestión Atlacomulco, Estado de México, *México*.
- Corrales, L. C., Marcela, D., Romero, A., Azucena Bohórquez Macías, J., Mar-Cela, A., & Vargas, C. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *NOVA*, (13), 55–81.
- Delegacion Milpa Alta. (2015). *Aviso por medio del cual se da a conocer el Programa de Acción Ante el Cambio Climático de la Delegación Milpa Alta (PACDEL Milpa Alta)*. Ciudad de México.
- Department of Ecology. (2014). *Treatment Specific Guidance Polymerization*. Washington.
- Elías, X. (2016). *Residuos Hospitalarios Capítulo 2: Tratamiento*.
- Environmental Protection Agency. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, D.C., U.S.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, C. F. de E. (2012). *Guía de usuario "Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos"*. México, D.F.
- Kiss, G., Flores, S., Encarnación, G., & Solórzano, G. (2007). *Caracterización del biogás generado en trece sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México*. Ciudad de México.
- Kleyböcker, A., Liebrich, M., Kasina, M., Kraume, M., Wittmaier, M., & Würdemann, H. (2012). Comparison of different procedures to stabilize biogas formation after process failure in a thermophilic waste digestion system: Influence of aggregate formation on process stability. *Waste Management*, 32(6), 1122–1130.
- Leonardo, F., & Rodríguez, B. (2015). *Boletín IIE "Energías Renovables, una alternativa viable para México"*. Ciudad de México.

- Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. (2003). *Diario Oficial de la Federación*. México.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 39(1), 35–48.
- M.Sc Golomeova S, Srebrenkoska, V., Krstevas, & Spasovas. (2013). *Solid Waste Treatment Technologies*. R. Macedonia.
- Machado, W. D., Melquíades, E., Van Gelderen, V., Alonso, M. A., & Urueña, M. R. (2012). *Biodigestión Anaeróbica A Escala Piloto Industrial De Residuos Semisólidos Generados En La Industrialización Del Limón*. La Plata, Argentina.
- Monroy, O., Fama, G., Meraz, M., Montoya, L., & Macarie, H. (1998). Digestión Anaerobia en Mexico: Estado de la Tecnología. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. México.
- Morales Rojo, P. M. (2005). *Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento*. UDLAP. México.
- Moreno, A. D., Rodríguez, M. G., Velasco, A. R., Carlos, J., Enriquez, M., Lara, R. G., Hernández, D. (2012). Mexico City's municipal solid waste characteristics and composition analysis, 29(1), 39–46.
- NADF-024. (2015). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013*. *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México.
- OECD. (2015). *Environment at a Glance 2000: OECD Indicators*. OECD Publishing.
- Organización Meteorológica Mundial. (2013). *Boletín sobre los gases de efecto invernadero*. Ginebra, Suiza.
- Prof. María Teresa Varnero Moreno. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile.
- NOM-098. (2004). *NOM-098-SEMARNAT-2002*. *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad De Mexico.
- Ramirez Hernández, F. (2015). *Inventario nacional de emisiones de gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Ciudad de México.
- Ramón Amieva Gálvez, J., Tanya Müller García, I., Yolanda Alonso Olvera,

L., Arriaga Ramos Zentli, Rodríguez González Jorge, Emigdio Sánchez Pólito Edith, Nandeye Ruiz Zacatzi Andrés, Flores Martínez Irving Delit López, E., & Arabia Rojas González Diseño Edgar Rojas Ruiz, Nubia Castillo Velasco Juan José Félix, Granados Castro, I. D. (2018). *Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2017*. Ciudad de México.

- NOM-052. (2005). *NORMA Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2003. Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2016). *2016-2020 Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Ciudad de México.
- SEDEREC. (2018). *La grandeza del nopal Identidad y orgullo nacional Recetario de Milpa Alta para el mundo*.
- NOM-083. (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2015). *AVISO para el reporte del Registro Nacional de Emisiones*. Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2016). *Guía para la elaboración de la cédula de operación anual*. Ciudad de México.
- Markets, M. (2008). *El metano como gas de Efecto Invernadero*. Washington D.C. USA.