Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez

Fundamentos para elegir la tecnología de digestión en la construcción de una planta de tratamiento de FORSU

Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México

MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA

SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos:
Av. Insurgentes Sur 813, oficina 1301
Col. Nápoles, CP 03810
Ciudad de México, México

Ejecutado por:
GIZ México

Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico
SEMARNAT

Dirección General de Energías Limpias
SENER

Por encargo de:
Ministerio Federal de Cooperación Económica
y Desarrollo (BMZ) de Alemania

Autores:
El contenido de esta publicación se fundamenta en el "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", que fue elaborado por la Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad De Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Participantes en el Proyecto:
Dr. Alfonso Durán Moreno
Dr. German González Dávila
M. en I. Germán Basurto García
I.C. Gabriel Castelán Rodríguez
I.Q. Héctor Patricio Fabián
I.Q. Susana Diana Peralta Miranda
I.Q. Mauro Aguilar Castro
Pas. I.Q. Andrea Sánchez Parga

Análisis de información, diseño y coordinación editorial:
Leticia Llamas De la Torre, México

Fotografías de forros:
Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad De Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Fecha de publicación:
Septiembre, 2018

Las opiniones expresadas en este documento no necesariamente representan la opinión de SEMARNAT, SENER y la GIZ. Se autoriza la reproducción parcial o total, siempre y cuando sea sin fines de lucro y se cite a la fuente de referencia.

Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez

Fundamentos para elegir la tecnología de digestión en la construcción de una planta de tratamiento de FORSU

ENRES

Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México

La presente publicación fue elaborada como parte del Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos (EnRes). Su objetivo es introducir, como una opción tecnológica, el aprovechamiento energético en la gestión de residuos urbanos y lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual en México.

El programa es desarrollado en conjunto con la Secretaría de Energía (SENER) –Dirección General de Energías Limpias– y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) –Dirección General Ambiental, Urbano y Turístico–, siendo ejecutado por la Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ) a través del encargo del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

El contenido de esta edición presenta los resultados del "Estudio de digestión anaerobia húmeda y seca a nivel planta piloto para la construcción de una planta de tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en el municipio de Naucalpan",realizado por la Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad De Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el objetivo de hacer los estudios del potencial bioquímico de generación de metano a nivel laboratorio y realizar pruebas de digestión anaeróbia, en las modalidades húmeda y seca a nivel de planta piloto de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) del municipio de Naucalpan.

CONTENIDO

SIGLAS Y SÍMBOLOS 5

RESUMEN EJECUTIVO 7

1. PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LA UNAM (3PBG) 9

2. FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL MUNICIPIO DE NAUCALPAN DE JUÁREZ 13
- 2.1. Cantidades procesadas de FORSU 13
- 2.2. Caracterización de la FORSU 16
  - 2.2.1. Caracterización física 16
  - 2.2.2. Caracterización fisicoquímica de la FORSU y del digestato 18

3. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) 23

4. OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS 3PBG 27
- 4.1. Digestión anaeróbica húmeda 27
  - 4.1.1. Valores de temperatura en la digestión anaeróbica húmeda 27
  - 4.1.2. Valores de pH en la digestión anaeróbica húmeda 28
  - 4.1.3. Valores de la acidez volátil y de la alcalinidad en la digestión anaeróbica húmeda 29
  - 4.1.4. Cuantificación y caracterización del biogás producido 29
  - 4.1.5. Generación eléctrica 31
- 4.2. Digestión anaeróbica seca 32

5. BALANCES DE MATERIA PARA EL DIGESTOR ANAERÓBICO HÚMEDO 35

6. PRUEBA DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN CONTINUO CON UN DIGESTOR ANAERÓBICO HÚMEDO DE 5 LITROS 39

7. ANTECEDENTES DE LA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON FORSU 43
- 7.1. Método de evaluación multicriterio 43
  - 7.1.1 Visual PROMETHEE 45
- 7.2. Evaluación multicriterio de las tecnologías de digestión anaeróbica 45
  - 7.2.1. Diagrama Jerárquico 45
  - 7.2.2. Definición y ponderación de los criterios y sus variables 45
  - 7.2.3. Asignación de pesos específicos 49
- 7.3. Resultados de la evaluación multicriterio de tecnologías 52
- 7.4. Conclusiones de la prueba multicriterio 59

8. CONCLUSIONES 61
- 8.1. Conclusiones para FORSU de mercados y tianguis 61
- 8.2. Conclusiones para FORSU domiciliaria 61
- 8.3. Conclusiones para FORSU de grandes generadores 62
- 8.4. Conclusiones generales 63

REFERENCIAS 65

ANEXO 1 MÉTODO DE CUARTEO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS 69

ANEXO 2 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y HUMEDAD DEL RESIDUO ORGÁNICO 71

ANEXO 3 DILUCIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU) 73

ANEXO 4 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) 75

ANEXO 5 NITRÓGENO AMONIACAL ($N\text{-}NH_4^+$) 79

ANEXO 6 FÓSFORO TOTAL (PT) 83

ANEXO 7 GENERACIÓN DE BIOGÁS 87

ANEXO 8 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ALCALINIDAD ALFA (α) 89

ANEXO 9 REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA RECEPCIÓN DE RESIDUOS Y LA CARACTERIZACIÓN DE LA FORSU 91

GRÁFICOS

GRÁFICO 1 Vista satelital de la ubicación de la Planta Piloto de Producción de Biogás de la UNAM (3PBg) 9
GRÁFICO 2 Planta de producción de biogás de la UNAM (3PBg) 10
GRÁFICO 3 Personal del Departamento de Servicios Públicos de Naucalpan de Juárez traslada la FORSU de mercado y tianguis a la 3PBg 14
GRÁFICO 4 Personal de la Dirección General de Medio Ambiente de Naucalpan de Juárez realiza el traslado de la FORSU domiciliaria a la 3PBg 14
GRÁFICO 5 Traslado a la 3PBg de la FORSU de grandes generadores 15
GRÁFICO 6 Método de cuarteo realizado a la FORSU de grandes generadores 15
GRÁFICO 7 Diferencia visible de humedad entre la FORSU de mercados y tianguis con más y la domiciliaria con menos 18
GRÁFICO 8 Producción específica de biogás – PBM de FORSU de mercados y tianguis 23
GRÁFICO 9 Producción específica de biogás – PBM de FORSU domiciliaria 24
GRÁFICO 10 Producción específica de biogás – PBM de FORSU de grandes generadores 25
GRÁFICO 11 Producción específica de biogás – PBM de los diferentes tipos de muestras (comparación) 25
GRÁFICO 12 Valores de pH dentro del digestor anaeróbico húmedo 28
GRÁFICO 13 Índice de alcalinidad alfa (α) en el digestor anaeróbico húmedo 29
GRÁFICO 14 Módulos de digestión seca de la 3PBg 32
GRÁFICO 15 Esquema simplificado y balance de la operación del digestor húmedo (FORSU de mercados y tianguis) 35
GRÁFICO 16 Esquema simplificado y balance de la operación del digestor húmedo (FORSU domiciliaria) 36
GRÁFICO 17 Configuración de reactor de 5 litros para tratamiento de FORSU de grandes generadores a nivel laboratorio 39
GRÁFICO 18 Producción acumulada de biogás para el reactor de 5 litros con FORSU de grandes generadores 40
GRÁFICO 19 Diagrama jerárquico para la evaluación multicriterio 46
GRAFICO 20 PROMETHEE I – Ranking parcial 52
GRAFICO 21 PROMETHEE II – Ranking completo 53
GRAFICO 22 Diamante PROMETHEE 54
GRÁFICO 23 Flujos parciales y totales de cada una de las tecnologías evaluadas 55
GRÁFICO 24 Flujos parciales y totales promedio para las tecnologías secas y húmedas 56
GRAFICO 25 PROMETHEE I – Ranking parcial sin tomar en cuenta las tecnologías BEKON y BTA 57
GRAFICO 26 PROMETHEE II – Ranking completo sin tomar en cuenta las tecnologías BEKON y BTA 58
GRÁFICO 27 Flujos promedio para las tecnologías húmedas y secas (sin tomar en cuenta a BEKON y BTA) 59

TABLAS

TABLA 1 Cantidad de FORSU de la muestra representativa que fue suministrada a la 3PBg 16
TABLA 2 Caracterización física de la FORSU (porcentajes en masa) 17
TABLA 3 Porcentajes promedio de humedad y de sólidos según el tipo de FORSU 18
TABLA 4 Demanda química de oxígeno (DQO) 19
TABLA 5 Nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) y fósforo total (PT) 20
TABLA 6 Alcalinidad, ácidos grasos volátiles (AGV) e índice alfa (α) 21
TABLA 7 Temperatura promedio en los digestores 28
TABLA 8 Biogás generado en el digestor anaeróbico húmedo (valores promedio) 30
TABLA 9 Parámetros estadísticos de los valores de porcentaje de metano (CH_4) en el biogás producido 30
TABLA 10 Características de los principales procesos comerciales 31
TABLA 11 Generación de energía eléctrica por tipo de FORSU 32
TABLA 12 Biogás generado en los digestores anaeróbicos secos (valores promedio) 33
TABLA 13 Ejemplo de producción de biogás con sustratos de la Central de Abasto Tultitlan, del Estado de México 33
TABLA 14 Composición promedio del biogás para FORSU de grandes generadores 41
TABLA 15 Grupo de Criterios Técnicos: Descripción de criterios y subcriterios 47
TABLA 16 Escala de complejidad del subcriterio 'digestor' 47
TABLA 17 Escala de complejidad del subcriterio 'pretratamiento' 48
TABLA 18 Escala de complejidad del subcriterio 'digestato' 48
TABLA 19 Descripción de criterios económicos 48
TABLA 20 Ponderación de los Grupos de Criterios 49
TABLA 21 Ponderación de los subcriterios del Grupo de Criterios Técnicos 50
TABLA 22 Ponderación de los subcriterios económicos 50
TABLA 23 Matriz base para la evaluación multicriterio con Visual PROMETHEE 51
TABLA 24 Flujos parciales y totales para cada una de las alternativas evaluadas 55
TABLA 25 Flujos parciales y totales promedio para cada tecnología (promedio) 56
TABLA 26 Flujos **Φ** para cada tecnología, sin tomar en cuenta a BEKON y BTA (promedio) 58

SIGLAS Y SÍMBOLOS

α	Alfa
3PBg	Planta Piloto de Producción de Biogás de la Facultad de Química de la UNAM
AGV	Ácidos grasos volátiles
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
CalEPA	Agencia de Protección Ambiental de California (California Enviromental Protection Agency)
CETRAN	Centro de Transferencia de Residuos Sólidos+B26
CH_3COOH	Ácido acético
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
COMECYT	Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología
CUSI Almaraz	Clínica Universitaria de Salud Integral Almaraz
DM	Factor de decisión (decision maker)
DQO	Demanda química de oxígeno
FES	Facultad de Estudios Superiores
FORDECYT	Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GEI	Gases de efecto invernadero
GIZ	Cooperación Alemana al Desarrollo (Alemania)
H_2O	Agua
H_2S	Sulfuro de hidrógeno
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
HNO_3	Ácido nítrico
L	Litro
LN	Litro normalizado
LN/kg	Litro normalizado por kilogramo
$N\text{-}NH_4^+$	Nitrógeno amoniacal
N_2	Nitrógeno molecular o dinitrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
PBM	Potencial bioquímico de metano
PT	Fósforo total
SECITI	Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México
SF	Sólidos fijos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TRH	Tiempos de retención hidráulicos
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UPIIA	Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento es un informe de actividades del proyecto titulado "Estudio de digestión anaerobia húmeda y seca a nivel planta piloto para la construcción de una planta de tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en el municipio de Naucalpan", el cual concentra los resultados obtenidos durante la operación de la Planta Piloto de Producción de Biogás de la Facultad de Química de la UNAM, denominado 3PBg, en el que se utilizaron diferentes sustratos suministrados por el municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México.

Dicho estudio se dividió en tres etapas experimentales, dos dentro de la 3PBg y una a nivel laboratorio, como se describen a continuación:

- **Primera etapa experimental** (del 10 de julio al 24 de octubre del 2017): Se realizó tratando en la 3PBg FORSU procedente de mercados y tianguis.
- **Segunda etapa experimental** (del 25 de octubre al 30 de noviembre del 2017): Se realizó utilizando FORSU de procedencia domiciliaria que fue recolectada y trasladada a la 3PBg por personal del municipio de Naucalpan.

El suministro de la cantidad de FORSU necesaria para la operación de la 3PBg se estableció tras varias reuniones con personal de la Dirección General del Medio Ambiente; de la Dirección General de Servicios Públicos del municipio de Naucalpan de Juárez; de la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ) y de la Facultad de Química de la UNAM. Se acordó que el suministro de FORSU a la 3PBg se efectuaría tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes), debido a las dificultades para separar la fracción orgánica del total de los residuos sólidos urbanos, así como por las complicaciones de gestión en el área de Servicios Públicos del municipio.

Todos los lotes de FORSU se caracterizaron y analizaron en el laboratorio móvil de la 3PBg el mismo día que fueron suministrados. Algunos análisis específicos, como la demanda química de oxígeno (DQO) y los ácidos grasos volátiles (AGV) se determinaron en los laboratorios de la Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental (UPIIA) o en el conjunto E de la Facultad de Química. Todos los días se registraron los flujos de biogás y su composición, así como los parámetros de operación de la planta piloto.

- **Tercera etapa experimental**: Debido a que la duración del proyecto no permitía realizar las pruebas *in situ* se llevaron a cabo en el laboratorio. No obstante, se hicieron bajo condiciones de operación similares a las que se presentarían en la 3PBg, utilizando como sustrato FORSU recolectada en hipermercados del municipio de Naucalpan de Juárez (Costco Satélite, Soriana Echegaray y Mega San Mateo), denominados como 'grandes generadores'.

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio 301 E de la Facultad de Química de la UNAM, y consistieron en la operación de un reactor de digestión anaeróbica de 5 litros de capacidad y permitieron determinar la cantidad y composición de biogás que puede obtenerse a partir de la FORSU producida en el municipio de Naucalpan de Juárez.

PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LA UNAM (3PBG) 1

La 3PBg, se encuentra localizada a un costado de la Clínica Universitaria de Salud Integral Almaraz (CUSI Almaraz) ubicada en avenida Jiménez Gallardo s/n, San Sebastián Xhala km 2.5, en el municipio de Cuautitlán de Romero Rubio, Estado de México (**GRÁFICO 1**). El terreno es propiedad de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala (FES Iztacala).

La 3PBg fue construida con recursos del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) con el número de proyecto 174710, con la concurrencia de fondos por parte de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI) y el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT). Fue diseñada por académicos e ingenieros de la Facultad de Química de la UNAM, integrados a la Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental (UPIIA).

GRÁFICO 1 Vista satelital de la ubicación de la Planta Piloto de Producción de Biogás de la UNAM (3PBg)

Fuente: Google.

La 3PBg se construyó en el 2015, con el propósito de realizar estudios de producción de biogás utilizando la FORSU por medio de la digestión anaeróbica y se encuentra dividida en las siguientes secciones:

1. Pretratamiento.
2. Servicios auxiliares.
3. Tratamiento de agua residual.
4. Digestión húmeda.
5. Digestión seca.
6. Almacenamiento y tratamiento de biogás.
7. Generación de energía eléctrica.
8. Área de control.

En la sección 1 (pretratamiento) se realiza la recepción, molienda, trituración y mezcla con agua de la FORSU recibida.

En la sección 2 (servicios auxiliares) se preparan y dosifican los reactivos necesarios para el proceso de digestión anaeróbica. También en ella se encuentran los sistemas de suministro de agua y de calentamiento de los digestores.

En la sección 3 (tratamiento de agua residual) se lleva a cabo el tratamiento de lixiviados de los digestores anaeróbicos secos y el agua residual proveniente de la deshidratación del exceso de digestado extraído del digestor anaeróbico húmedo.

En la sección 4 (digestión húmeda) hay un digestor anaerobio húmedo de 3.6 m de altura con capacidad de 25 m^3.

En la sección 5 (digestión seca) hay tres reactores de digestión anaeróbica seca (no hay adición de agua), cada uno con capacidad de 3 m^3.

En la sección 6 (almacenamiento y tratamiento de biogás) tienen lugar un sistema de acumulación de condensados y dos unidades de reacción química con un material ferroso para la remoción de sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás.

En la sección 7 (generación de energía eléctrica) se lleva a cabo el proceso de generación eléctrica.

En la sección 8 (área de control) se concentran el centro de control de motores y el panel de control de la planta.

La 3PBg cuenta con reactores diseñados para la implementación de las tecnologías de digestión anaeróbica húmeda y seca, en secciones independientes. En ambos tipos de reactores se llevan a cabo los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Para la digestión anaeróbica húmeda se utiliza un digestor con agitación continua y para la seca tres digestores por lotes, sin agitación.

El **GRÁFICO 2** muestra la 3PBg en la que se llevaron a cabo las pruebas de digestión anaeróbica con FORSU proveniente del municipio de Naucalpan de Juárez.

GRÁFICO 2 **Planta de producción de biogás de la UNAM (3PBg)**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

Por diseño, la 3PBg puede operar 24 horas por día los 360 días del año y tiene una capacidad de tratamiento de FORSU de 500 kg/día en el reactor de digestión anaeróbica húmeda y 100 kg/día entre los tres reactores de digestión anaeróbica seca; lo que da un total de 600 kg/día.

En el estudio se emplearon tres tipos de FORSU recolectados en el municipio de Naucalpan de Juárez, en el Estado de México y se denominaron con base en su origen:

1. Mercados y tianguis.
2. Domiciliaria.
3. Grandes generadores.

La caracterización de la FORSU se realizó al momento de su recepción en la 3PBg y consistió en la obtención de una muestra representativa de 50 kg de cada lote y el pesado de cada uno de los tipos de materiales que constituían la muestra. Parte de esta muestra era analizada en el laboratorio móvil de la 3PBg y en los laboratorios 301 a 303 del conjunto E de la Facultad de Química de la UNAM.

En los apartados siguientes se presentan datos de la cantidad de FORSU que fue llevada a la 3PBg y los resultados de sus pruebas de caracterización y composición.

2.1. Cantidades procesadas de FORSU

El suministro de FORSU por parte del municipio de Naucalpan de Juárez hacia la 3PBg se realizó tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes). Esta frecuencia se determinó tras varias reuniones de análisis y planeación en las que participó personal de los departamentos de medio ambiente y de servicios públicos de Naucalpan de Juárez; así como de la GIZ y de la Facultad de Química de la UNAM.

Para decidir la periodicidad del suministro influyeron diversos factores, entre los que destacan: la problemática para la gestión de los residuos (obtención, manejo y traslado); las dificultades para la separación de los residuos orgánicos y la administración de los recursos humanos, materiales y económicos asignados para este proceso.

La FORSU de mercados y tianguis provenía de tres sitios pertenecientes al municipio de Naucalpan de Juárez: San Mateo, El Molinito y Naucalpan Centro y fue recolectada, separada y transportada en botes de 200 L. Esta actividad se realizó del 10 de julio al 24 de octubre de 2017 y estuvo a cargo de personal del Departamento de Servicios Públicos de Naucalpan de Juárez, bajo la supervisión del Sr. Hugo Rosales. En el **GRÁFICO 3** se aprecia una parte de este proceso.

Del 25 de octubre al 24 de noviembre del 2017 se suministró FORSU domiciliaria a la 3PBg, durante dicho período fue recolectada en el Centro de Transferencia de Residuos Sólidos (CETRAN), ubicado en el paraje El Zopilote de San Francisco Chimalpa, Naucalpan de Juárez, y fue transportada en dos contenedores de 1100 litros cada uno. Esta actividad estuvo coordinada por el C. Sergio Rodríguez Muñoz, Director General de Medio Ambiente de Naucalpan de Juárez y supervisada por su asistente la C. Emma Arreguín López. En el **GRÁFICO 4** se aprecia una parte del proceso.

GRÁFICO 3 **Personal del Departamento de Servicios Públicos de Naucalpan de Juárez traslada la FORSU de mercado y tianguis a la 3PBg**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRÁFICO 4 **Personal de la Dirección General de Medio Ambiente de Naucalpan de Juárez realiza el traslado de la FORSU domiciliaria a la 3PBg**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

La FORSU producida por grandes generadores fue obtenida en los hipermercados Costco Satélite, Soriana Echegaray y Mega San Mateo, dio un total de 330 kg. También fue recolectada por personal de la Dirección de Medio Ambiente de Naucalpan de Juárez y trasladada a la 3PBg (**GRÁFICO 5**), allí se le practicó un cuarteo para obtener una muestra representativa de 50 kg (**GRÁFICO 6**), para realizar con ella las pruebas de generación de biogás en el reactor de 5 litros del laboratorio 303 de la UPIIA de Ciudad Universitaria. Dicha prueba se realizó de noviembre a diciembre de 2017.

GRÁFICO 5 **Traslado a la 3PBg de la FORSU de grandes generadores**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRÁFICO 6 **Método de cuarteo realizado a la FORSU de grandes generadores**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

Las muestras de FORSU recibidas en la 3PBg se pesaron antes de ser procesadas y se llevó un registro de los valores obtenidos. La **TABLA 1** presenta el origen y las cantidades suministradas de FORSU para cada tipo de reactor de digestión anaeróbica. El porcentaje aprovechable de residuos se obtuvo como resultado de la diferencia del peso inicial de los residuos suministrado y de los residuos rechazados. También se aprecia que la cantidad de residuos orgánicos aprovechables es mayor en las fuentes de suministro de mercados y tianguis, seguido de la fuente domiciliaria y al final están los grandes generadores, dado que una gran cantidad de los residuos de estos últimos venían aún empacados.

TABLA 1 **Cantidad de FORSU de la muestra representativa que fue suministrada a la 3PBg**

Tipo de digestión anaeróbica	Tipo de FORSU	Cantidad aprovechable	FORSU suministrado [toneladas]
Húmeda	Mercados y tianguis	88.91%	19.30
	Domiciliarios	85.66%	5.37
	Grandes generadores	79.95%	0.05
Seca	Mercados y tianguis	93.38%	1.36
	Domiciliarios	87.12%	1.01
		Total	27.04

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

2.2. Caracterización de la FORSU

El estudio de caracterización de los residuos orgánicos procesados en la 3PBg consistió en dos tipos de determinaciones:

- **Caracterización física:** Se pesó cada uno de los componentes identificables visualmente en la muestra y se determinó el porcentaje de los diferentes subproductos que las componen y la determinación del peso volumétrico, de acuerdo a lo establecido en las Normas Mexicanas NMX-AA-019-1985 y NMX-AA-022-1985.
- **Caracterización fisicoquímica:** Las muestras se procesaron en el laboratorio para determinar el porcentaje de los diferentes componentes estructurales que las integraban.

Estas determinaciones se realizaron en las instalaciones de la 3PBg.

2.2.1. Caracterización física

La **TABLA 2** presenta los resultados de la caracterización física de los residuos orgánicos suministrados, tanto para el sistema de digestión anaeróbica húmeda como para el de la seca.

En la caracterización física de la FORSU se establecieron 13 subproductos, de los cuales, seis eran tratables mediante digestión anaeróbica (vegetales, frutas, cárnicos, jardinería, lixiviados y otros orgánicos); seis eran inorgánicos valorizables y un subproducto fue no valorizable (residuos sanitarios).

La FORSU suministrada se analizó en el laboratorio de la 3PBg para determinar el porcentaje de humedad y de sólidos totales (ST), parámetros importantes para calcular la cantidad de agua que se debía adicionar en su pretratamiento para la digestión anaeróbica húmeda, con el fin de conseguir una mezcla de alimentación de 10 % de ST. La Agencia de Protección Ambiental de California, también llamada CalEPA por sus siglas en inglés (California Enviromental Protection Agency), establece en su reporte sobre tecnologías de gestión anaeróbica para FORSU [9] que los sistemas de digestión húmeda deben tener un contenido máximo de ST de 15 % mientras que en los sistemas de digestión seca es mayor de 15 %.

Para el caso de la alimentación de los digestores anaeróbicos secos, el pretratamiento consistió únicamente de la disminución del tamaño de partícula en el triturador de la planta; a ninguno de los reactores de digestión seca se le adicionó agua.

TABLA 2 **Caracterización física de la FORSU (porcentajes en masa)**

Subproductos	Digestión húmeda			Digestión seca	
	Tipo de FORSU			Tipo de FORSU	
	Mercados y tianguis	Domiciliaria	Grandes generadores	Mercados y tianguis	Domiciliaria
Vegetales	33.900 %	43.000 %	13.000 %	37.150 %	16.900 %
Frutas	53.600 %	21.000 %	38.000 %	57.600 %	41.400 %
Otros orgánicos*	1.000 %	21.000 %	29.000 %	0.000 %	34.300 %
Cárnicos	0.500 %	4.000 %	1.000 %	0.000 %	1.000 %
Jardinería	6.000 %	5.000 %	1.000 %	0.850 %	1.100 %
Plástico	2.500 %	3.000 %	14.000 %	2.750 %	2.400 %
Cartón	0.900 %	1.000 %	2.000 %	0.000 %	1.000 %
Lixiviados	1.700 %	1.000 %	2.000 %	1.450 %	1.700 %
Madera	0.010 %	0.030 %	0.000 %	0.200 %	0.000 %
Sanitarios	0.010 %	0.030 %	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Metal	0.003%	0.130 %	0.200 %	0.000 %	0.100 %
Tela	0.003%	0.040 %	0.000 %	0.000 %	0.000 %
Vidrio	0.000 %	0.120 %	0.000 %	0.000 %	0.100 %

* Se refiere a los subproductos cuya naturaleza no se puede diferenciar visualmente, tratándose entonces de una especie de pasta heterogénea, compuesta de residuos de pan, tortillas, pastas, y en general de alimentos cocinados.

Nota: En el Anexo 1 se presenta la metodología empleada para realizar la caracterización de los residuos orgánicos.

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

La **TABLA 3** presenta los valores promedio de humedad y de sólidos obtenidos de acuerdo a los diferentes tipos de residuos orgánicos.

Como se observa en la **TABLA 3**, el tipo de FORSU de grandes generadores es el que presenta la mayor cantidad de ST, seguido por la de origen domiciliario y al final los residuos orgánicos de mercados y tianguis, con 30.37 %, 25.56 % y 12.78 %, respectivamente. Esto quiere decir que la FORSU de mercados y tianguis es la que requiere la menor cantidad de agua para lograr la concentración de 10 % de ST para alimentar al reactor de digestión anaeróbica húmeda.

La FORSU de mercados y tianguis, principalmente las verduras y frutas crudas, contiene una elevada cantidad de humedad de forma natural, en cambio, en la FORSU domiciliaria se encuentra una cantidad importante de alimentos procesados a nivel industrial y otros cocinados de forma domiciliaria, lo que repercute en un menor contenido de humedad (**GRÁFICO 7**).

TABLA 3 **Porcentajes promedio de humedad y de sólidos según el tipo de FORSU**

Parámetros	Digestión húmeda			Digestión seca	
	Tipo de FORSU				
	Mercados y tianguis	Domiciliaria	Grandes generadores	Mercados y tianguis	Domiciliaria
Humedad	87.22 %	74.44 %	69.63 %	89.00 %	77.40 %
Sólidos totales (ST)	12.78 %	25.56 %	30.37 %	11.01 %	22.61 %
Sólidos volátiles (SV)	11.60 %	22.23 %	27.05 %	10.21 %	20.49 %
Sólidos fijos (SF)	1.18 %	3.33 %	3.32 %	0.80 %	2.12 %

NOTA: En los Anexos 2 y 3 se han incluido las metodologías empleadas para determinar el porcentaje de humedad y de ST de la FORSU, así como la metodología empleada para determinar la cantidad de agua de dilución para la FORSU con porcentajes de ST mayores al 10 %.

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRÁFICO 7 **Diferencia visible de humedad entre la FORSU de mercados y tianguis con más y la domiciliaria con menos**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

2.2.2. Caracterización fisicoquímica de la FORSU y del digestato.

En la mayoría de los trabajos enfocados a utilizar la FORSU como sustrato para procesos de digestión anaeróbica, los parámetros que se determinan de forma común son: ST, SV, relación SV/ST, nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) y fósforo total (PT). Estas características son utilizadas para determinar de forma preliminar el contenido de materia biodegradable y la relación de nutrientes contenidos en la FORSU. Parámetros como los mencionados anteriormente permiten estimar valores teóricos de producción de biogás [8].

A continuación, se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos practicados a todas las muestras de FORSU procesadas en la 3PBg y los de los practicados a las muestras de digestato extraído del reactor de digestión húmeda.

2.2.2.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

Pocos trabajos realizan la determinación de la DQO debido a lo heterogénea que es la FORSU y a lo complicado que puede resultar reproducir los resultados, sin embargo, representa un criterio más para evaluar el contenido de materia orgánica de las muestras de FORSU y permite establecer el flujo másico a través de la carga orgánica, esto como un medio para elaborar un balance de masa con base en la remoción de materia orgánica.

La técnica para la determinación de la DQO consiste en una digestión ácida de la muestra a analizar, a una temperatura de 150°C, en reflujo cerrado durante dos horas y para su posterior análisis por fotometría a 600 nm (APHA 5220-D). La **TABLA 4** presenta los valores obtenidos para el digestato y para la FORSU.

TABLA 4 Demanda química de oxígeno (DQO)

Origen y tipo de sustrato		DQO (gO_2/kg)	Desviación estándar
Mercados y tianguis	Digestato	149	2.0
	FORSU	294	7.0
Domiciliaria	Digestato	105	21.2
	FORSU	228	71.0
Grandes generadores*	Digestato	167	2.0
	FORSU	394	21.4

* Estos experimentos de digestión anaeróbica se llevaron a cabo en el laboratorio, en un reactor de 5 litros.

Nota: En el Anexo 4 se muestra la metodología empleada para determinar la DQO en las muestras de residuos orgánicos.

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

Los valores de DQO de las muestras de la FORSU del municipio de Naucalpan de Juárez se encontraron en el intervalo de 228 a 394 gO_2/kg. Estos valores son equiparables con respecto a otros reportados a nivel internacional, por ejemplo, en Padua, Italia, se han reportado valores de 575 gO_2/kg [1]; en Karlsruhe, Alemania de 350 gO_2/kg [21], y en Cádiz, España de 140 gO_2/kg [18]. La composición de la FORSU es muy variable en todas partes del mundo.

En los reactores de digestión anaeróbica, la diferencia de valores de DQO entre la FORSU (sustrato) y el digestato, proporciona una medida del desempeño de los reactores en cuanto a la transformación de materia orgánica en biogás. De acuerdo con valores reportados en literatura [30], el porcentaje de remoción promedio de DQO en procesos de digestión anaeróbica se puede estimar entre 55 y 75 %, cabe mencionar que éste se logra en períodos prolongados de operación y composición de sustratos constantes.

En este estudio se observó que la remoción de materia orgánica en los reactores fue similar para todas las muestras, obteniéndose una remoción promedio ligeramente por debajo de lo reportado en bibliografía, con valores de 51 % para mercados y tianguis, de 45.9 % para domiciliaria y de 42.5 % para grandes generadores; hay que recordar que estos últimos fueron tratados en laboratorio únicamente, en un reactor de 5 litros. El que se requiere un tiempo más prolongado de operación con cada uno de los sustratos y una composición más estable del sustrato alimentado pueden ser las causas de los valores reportados.

2.2.2.2. Nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) y fósforo total (PT)

Las pruebas de $N\text{-}NH_4^+$ y PT brindan información importante con respecto a los nutrientes que pueden ser utilizados a partir de la FORSU suministrada al digestor, considerándose ampliamente aprovechables en el digestato producido, para generación de fertilizantes y mejoradores de suelo. La **TABLA 5** muestra los valores obtenidos.

La técnica para la determinación del $N\text{-}NH_4^+$ incluye un análisis por colorimetría y consiste en incrementar el pH de la muestra con hidróxido de sodio (NaOH) hasta 9.5, destilar la muestra y titular con ácido sulfúrico (H_2SO_4), registrando el volumen gastado.

La determinación de PT se lleva a cabo por fotometría y consiste en una digestión de H_2SO_4 y ácido nítrico (HNO_3), para luego utilizar el método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico para leer absorbancia a 470 nm (APHA, 4500-NH3C, 4500-NH3E, 4500-PB4, 4500-PC).

A partir de los resultados de la **TABLA 5** se puede observar que existe acumulación de $N\text{-}NH_4^+$ durante el proceso de digestión, del orden de 50 % para mercados y tianguis, 60 % para domiciliaria y 70 % para grandes generadores, esto se relaciona directamente con el contenido de productos cárnicos en las muestras, es decir, a mayor cantidad de proteínas presente en las muestras se encontrará mayor cantidad de nitrógeno.

En el proceso, el contenido de nitrógeno se ve directamente relacionado con el tipo de sustrato que es alimentado al digestor, es importante considerar FORSU con un contenido adecuado de cárnicos, lácteos y alimentos que proporcionen compuestos nitrogenados, ya que la calidad del digestato presentará valores más altos que pueden ser aprovechados en otros procesos económicamente viables, como la fertilización y el mejoramiento de suelos.

TABLA 5 Nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) y fósforo total (PT)

Origen y tipo de sustrato		$N\text{-}NH_4^+$ (g/kg)	Desviación estándar	PT (g/kg)	Desviación estándar
Mercados y tianguis	Digestato	1.4	0.0	2.8	0.1
	FORSU	0.7	0.3	25.2	0.7
Domiciliarios	Digestato	2.1	0.1	5.1	0.2
	FORSU	0.8	0.1	28	1.9
Grandes generadores	Digestato	2.2	0.1	6.4	0.2
	FORSU	0.6	0.1	20.7	3.5

Nota: En los Anexos 5 y 6 se presenta la metodología empleada para determinar el $N\text{-}NH_4^+$ y PT en FORSU y digestato en las muestras de residuos orgánicos.
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

2.2.2.3. Alcalinidad y ácidos grasos volátiles (AGV)

La alcalinidad y los AGV son parámetros de gran importancia para evaluar indirectamente el equilibrio de los diferentes tipos de comunidades microbianas presentes en los reactores anaeróbicos y la eficiencia de dichos reactores en cuanto a la producción de biogás.

La **TABLA 6** muestra las concentraciones de alcalinidad, en términos de gramos de carbonato de calcio ($CaCO_3$), y de gramos de ácido acético (CH_3COOH) como indicador de AGV, esto por kilogramo de FORSU.

La técnica para la determinación de la alcalinidad consiste en una titulación con H_2SO_4 de la muestra hasta alcanzar los valores de 5.75 para la alcalinidad parcial y de 4.3 para la alcalinidad intermedia. El valor del índice α es el resultado de la relación de las alcalinidades antes mencionadas [25].

La técnica para la determinación de ácidos grasos volátiles consiste en una titulación en retroceso a un pH de 4 y de 7 con NaOH a partir de la muestra acidificada a un pH de 3, centrifugada y puesta en ebullición [13].

Para el valor de pH de la FORSU, la literatura reporta un intervalo de entre 4.1 y 6.2 [29]. El valor de pH determinado para la FORSU de mercados y tianguis fue de 4, mientras que para la domiciliaria y para la de grandes generadores se obtuvieron valores de 4.6 y 4.5, respectivamente. Por otro lado, el valor de pH del digestato obtenido del procesamiento anaeróbico de los tres tipos de sustratos fue de 8.5.

TABLA 6 **Alcalinidad, ácidos grasos volátiles (AGV) e índice alfa (α)**

Origen y tipo de sustrato		Alcalinidad ($gCaCO_3/kg$)	Desviación estándar	AGV (gCH_3COOH/kg)	Desviación estándar	Índice α	Desviación estándar
Mercados y tianguis	Digestato	7.8	0.3	0.5	0.1	0.9	0.0
	FORSU	4.5	0.2	7.6	0.7	0.2	0.0
Domiciliarios	Digestato	8.1	0.1	3.8	0.7	0.7	0.1
	FORSU	3.7	0.4	5.5	1.2	0.4	0.1
Grandes generadores	Digestato	8.3	0.2	4.4	0.4	0.6	0.0
	FORSU	2.0	0.4	3.8	0.8	0.4	0.1

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

De acuerdo a Speece [26], la medición de la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la alcalinidad total es usualmente empleada para el control de la estabilidad del proceso anaeróbico. Al ser consumidos los AGV durante el proceso la alcalinidad en el medio aumenta. El digestato (producto de la digestión anaeróbica) incrementa su pH con relación a la FORSU hasta 8.5, aproximadamente un 50% más, debido al proceso de digestión generado dentro del reactor.

A la salida del digestor, la alcalinidad se incrementó para cada sustrato: 42 % para mercados y tianguis, 55 % para domiciliaria y 76 % para grandes generadores. La variación en el incremento de la alcalinidad del digestato (producto de la digestión anaeróbica) depende de cómo los AGV de los sustratos se consumen en el sistema, estabilizando el digestato y haciéndolo adecuado para los fines antes mencionados. Los valores reflejan un comportamiento adecuado y típico de procesos de digestión anaeróbica de FORSU, demostrando una correcta operación del digestor para el propósito de generación de biogás.

El valor del índice α es un valor recurrentemente utilizado en la literatura y en la práctica para una rápida interpretación del comportamiento alcalino en el medio de estudio, su valor se encuentra comprendido entre 0 y 1; la literatura recomienda tener en los reactores anaeróbicos valores cercanos a 1, pues esto es indicativo de una mejor capacidad amortiguadora en el sistema.

En este estudio, las muestras de FORSU analizadas obtuvieron valores promedio del índice α comprendidos entre 0.2 y 0.4. En las muestras de digestato, resultado del procesamiento anaeróbico, se obtuvieron valores de 0.9 para muestras de FORSU de mercados y tianguis, 0.7 para las domiciliarias y 0.6 para las de grandes generadores. Esto indica que en los reactores anaeróbicos se tuvo una adecuada adaptación de la biomasa a los diferentes sustratos y que, por lo tanto, estos operaron correctamente.

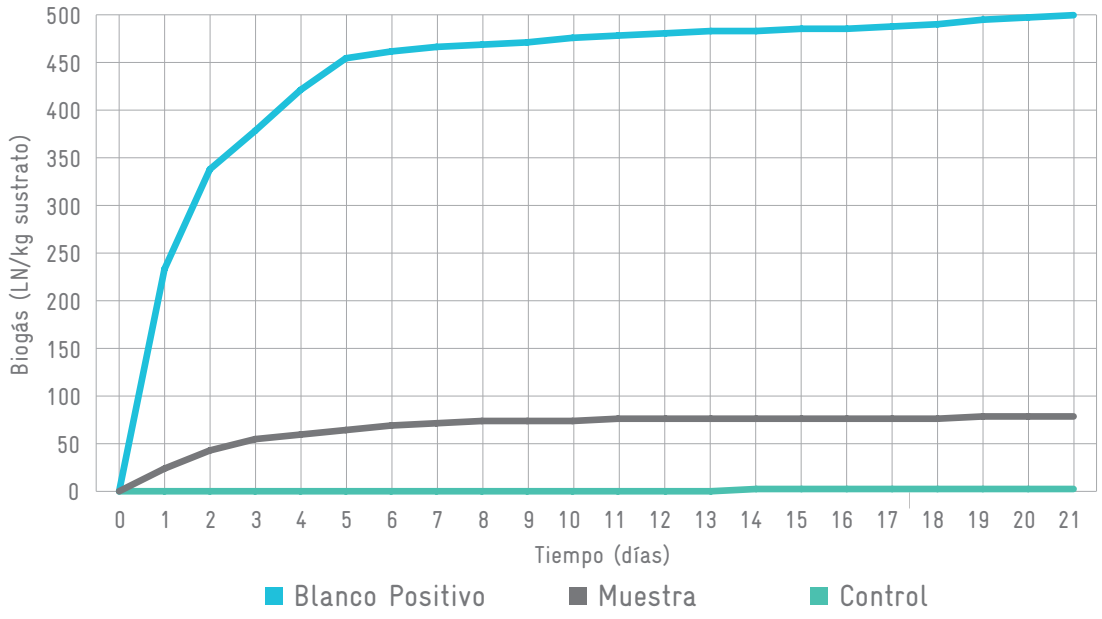
POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) 3

La técnica de potencial bioquímico de metano (PBM) se realiza para determinar la biodegradabilidad anaeróbica de los residuos y, con ello, evaluar su potencial de tratamiento para la producción máxima de biogás. Los resultados generados por esta prueba son la base para definir la tratabilidad de un sustrato determinado por medios anaeróbicos.

Con la finalidad de evaluar el sustrato que llega a la planta y simular en condiciones controladas el proceso de digestión anaeróbica al que se somete la FORSU, se montaron las pruebas en un equipo AMPTS, conocido así por sus siglas en inglés (Automatic Methane Potential Test System), utilizando una relación en masa de SV 2:1 de inóculo: sustrato, en digestores de vidrio de 500 mL sellados herméticamente e inertizados con gas nitrógeno para garantizar condiciones anaeróbicas. Se adicionó una solución de micronutrientes y un medio basal para garantizar el control de la alcalinidad.

El **GRÁFICO 8** expone los resultados de los experimentos con muestras de FORSU de mercados y tianguis, la línea que corresponde al blanco positivo se obtuvo con una mezcla conformada con digestato proveniente de la 3PBg como inóculo y dextrosa como sustrato completamente biodegradable, esta produjo 499.2 LN/kg dextrosa. La línea que corresponde al control se conformó con digestato como inóculo y a su vez como sustrato, tuvo una producción de 1.8 LN/kg digestato, en donde se observa que la producción de biogás del digestato fue 99.6 % inferior en comparación con la dextrosa como sustrato y, por último, la línea correspondiente a la muestra de mercados y tianguis tuvo una producción de 78 LN/kg FORSU, alcanzando un 16 % de lo producido con dextrosa.

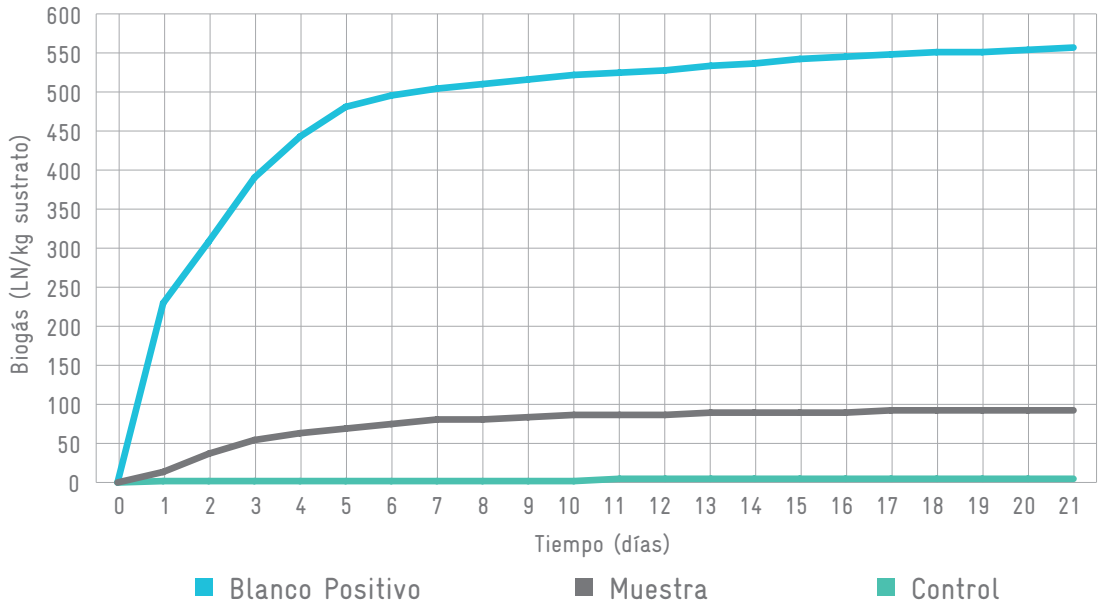
GRÁFICO 8 **Producción específica de biogás - PBM de FORSU de mercados y tianguis**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

El **GRÁFICO 9** expone los resultados de las muestras de FORSU domiciliaria. Los ensayos de producción de biogás se conformaron igual que en los que se utilizó FORSU de mercados y tianguis. Con el blanco positivo se tuvo una producción específica de 557 LN/kg dextrosa, de 4.2 LN/kg digestato para el control y 93.2 LN/kg FORSU para la muestra de FORSU domiciliaria, lo que corresponde a una producción de 99.2 % inferior del digestato con respecto a la dextrosa y a un 17 % de producción de la FORSU domiciliaria con respecto a la dextrosa.

GRÁFICO 9 **Producción específica de biogás - PBM de FORSU domiciliaria**



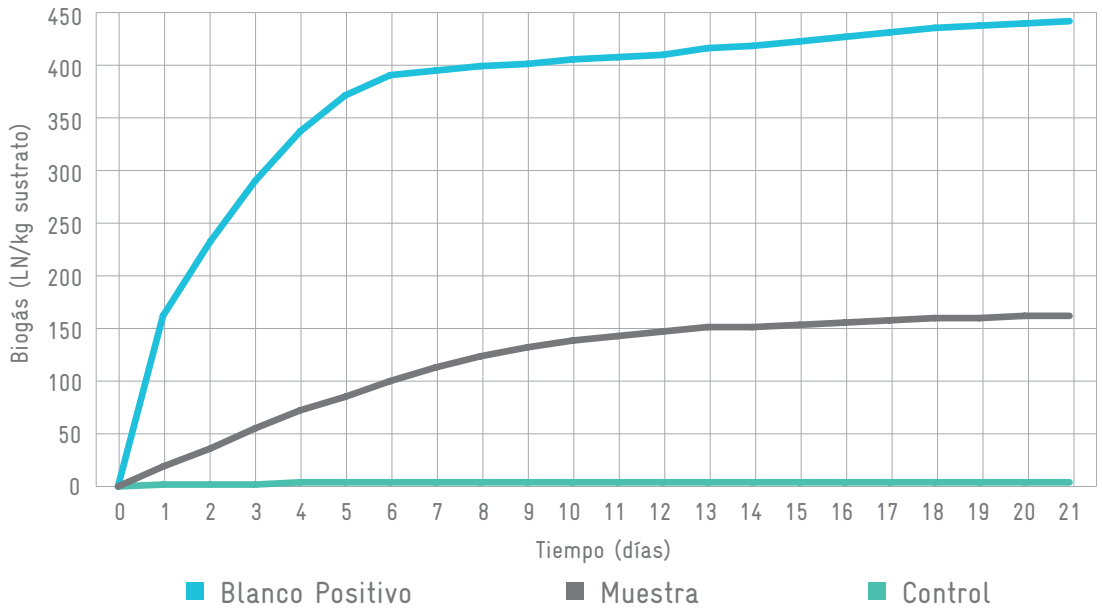
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

El **GRÁFICO 10** expone los resultados obtenidos de los ensayos realizados con la FORSU de grandes generadores. En este caso, la producción especifica en el blanco positivo fue de 445.2 LN/kg dextrosa, de 4.5 LN/kg digestato para el control y de 163.7 LN/kg FORSU para la muestra de grandes generadores, correspondiente a una producción inferior de 99 % de producción de biogás del digestato con respecto a la dextrosa y a un 37 % de producción de la FORSU domiciliaria con respecto a la dextrosa.

El **GRÁFICO 11** es el resumen de los resultados de la prueba de PBM realizada con las tres muestras, en él se observan las líneas obtenidas a partir de la prueba de PBM para cada una de las muestras analizadas, siendo la correspondiente a grandes generadores la que obtuvo el valor más grande, con una producción específica de 163.7 LN/kg FORSU, un 43 % más que lo producido por la muestra domiciliaria con la que se registró 93.2 LN/kg FORSU y un 52 % más que la muestra de mercados y tianguis, cuyo valor registrado fue 78 LN/kg FORSU.

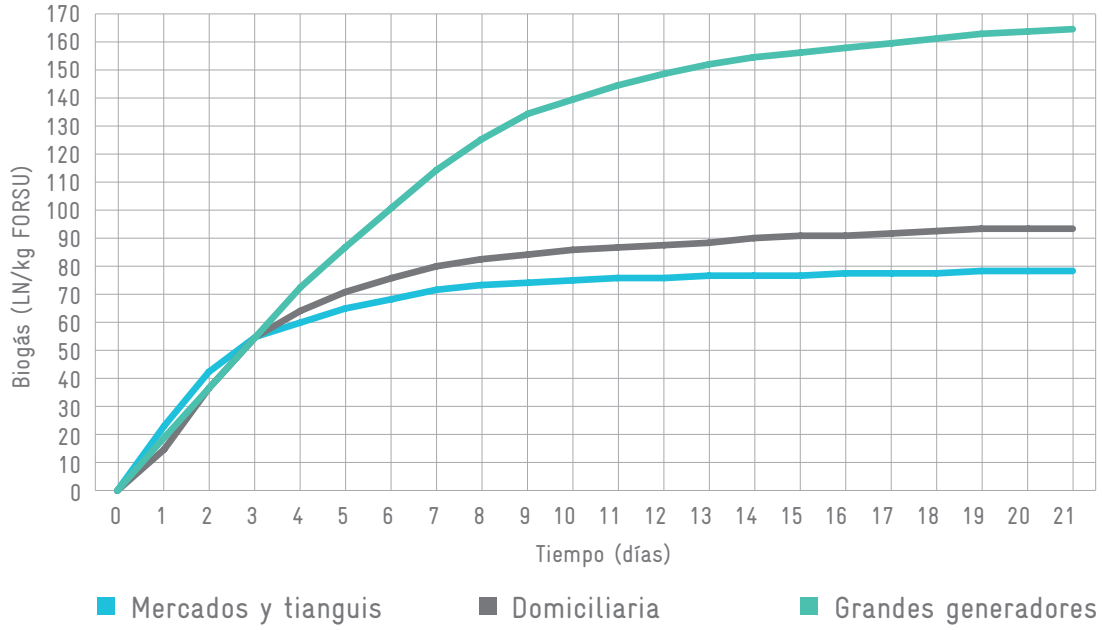
Procesos, como BTA de Alemania, reportan producciones de entre 80-120 LN/kg de sustrato. Linde KCA, también de Alemania, reporta producciones de entre 90-130 LN/kg de sustrato. Por lo anterior, se puede concluir que el proceso opera de forma típica, produciendo valores encontrados en literatura.

GRÁFICO 10 **Producción específica de biogás - PBM de FORSU de grandes generadores**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRÁFICO 11 **Producción específica de biogás - PBM de los diferentes tipos de muestras (comparación)**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS 3PBG 4

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la operación de la 3PBg. Se incluye información sobre las cantidades de los diferentes tipos de FORSU recibidos; se incluyen los resultados de la caracterización fisicoquímica de la FORSU y del digestato (subproducto de la degradación anaeróbica), el flujo de biogás y la composición de este.

Para el caso de residuos de grandes generadores, la producción de biogás se obtuvo a través de pruebas realizadas en laboratorios de la Facultad de Química de la UNAM, en un reactor de digestión húmeda de 5 litros, bajo condiciones de operación similares a las reportadas en el digestor anaeróbico húmedo de la 3PBg. Esto con la finalidad de comparar la producción de biogás mediante el proceso de digestión anaeróbica húmeda con los distintos sustratos; los resultados se presentan en el apartado 6 del presente informe.

En la 3PBg se tienen dos trenes de tratamiento de residuos orgánicos con procesos de digestión anaeróbica húmeda y de digestión anaeróbica seca. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la operación de cada tren de tratamiento.

4.1. Digestión anaeróbica húmeda

La estabilidad del digestor y el rendimiento de degradación de la FORSU están condicionados por determinadas variables que permiten conocer y estudiar el proceso de digestión anaeróbica. En esta sección se presentan los efectos de estas variables:

- Temperatura.
- pH.
- Acidez volátil.
- Alcalinidad sobre el proceso anaeróbico.

4.1.1. Valores de temperatura en la digestión anaeróbica húmeda

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura, a medida que ésta aumenta, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

En la **TABLA 7** se presentan los valores de las temperaturas de operación en los dos tipos de digestores. Se observa que las temperaturas promedio de operación del digestor anaeróbico húmedo y del digestor seco, son de 34.5°C y 33.1°C, respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del intervalo mesófilo recomendado para el crecimiento de microorganismos anaerobios, el cual, oscila entre 20 y 45°C y donde el valor óptimo de operación de estos microorganismos es de 35°C [4].

La digestión anaeróbica de FORSU de grandes generadores se realizó con una temperatura fija a 35°C, esto se debe a que el proceso de digestión de este sustrato se realizó en el laboratorio y bajo condiciones controladas.

TABLA 7 **Temperatura promedio en los digestores**

Parámetro	Digestor anaeróbico húmedo			Digestor anaeróbico seco	
	Tipo de FORSU				
	Mercados y tianguis	Domiciliaria	Grandes generadores	Mercados y tianguis	Domiciliaria
Máximo	36.6°C	36.2°C	35°C	34.8°C	33.7°C
Promedio	35.2°C	33.7°C	35°C	33.3°C	32.9°C
Mínimo	33.6°C	31.2°C	35°C	31.2°C	31.2°C

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

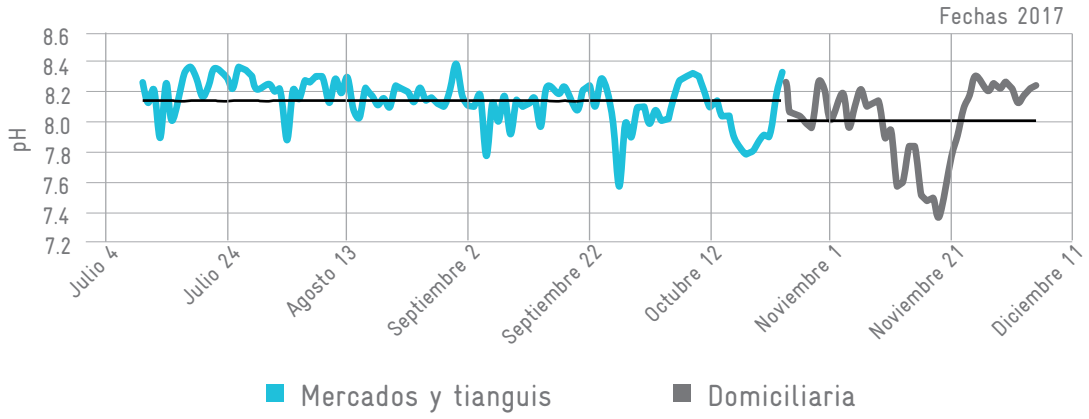
4.1.2. Valores de pH en la digestión anaeróbica húmeda

El pH es un valor importante que influye en el proceso de degradación de la FORSU, ya que afecta a la rapidez del proceso anaeróbico y determina el tipo de microorganismos que se pueden desarrollar.

En el **GRÁFICO 12** se muestra el comportamiento del pH dentro del digestor. Como se observa, los valores promedio de pH del digestato en el digestor anaeróbico húmedo fueron de 8.14 y 8.01, en la primera y segunda etapas, respectivamente. Estos valores se encuentran en el intervalo recomendado de 7 y 8.5 para el proceso de digestión anaeróbica [20].

Para el caso de la digestión anaeróbica húmeda utilizando FORSU de grandes generadores, el pH se mantuvo en un valor de 8.5, el cual también es un valor aceptable para la correcta operación de un digestor anaeróbico. Esta variación se debe al consumo de los AGV durante el proceso, lo que aumenta la alcalinidad del medio, y el digestato (producto de la digestión anaeróbica húmeda) incrementa su pH.

GRÁFICO 12 **Valores de pH dentro del digestor anaeróbico húmedo**



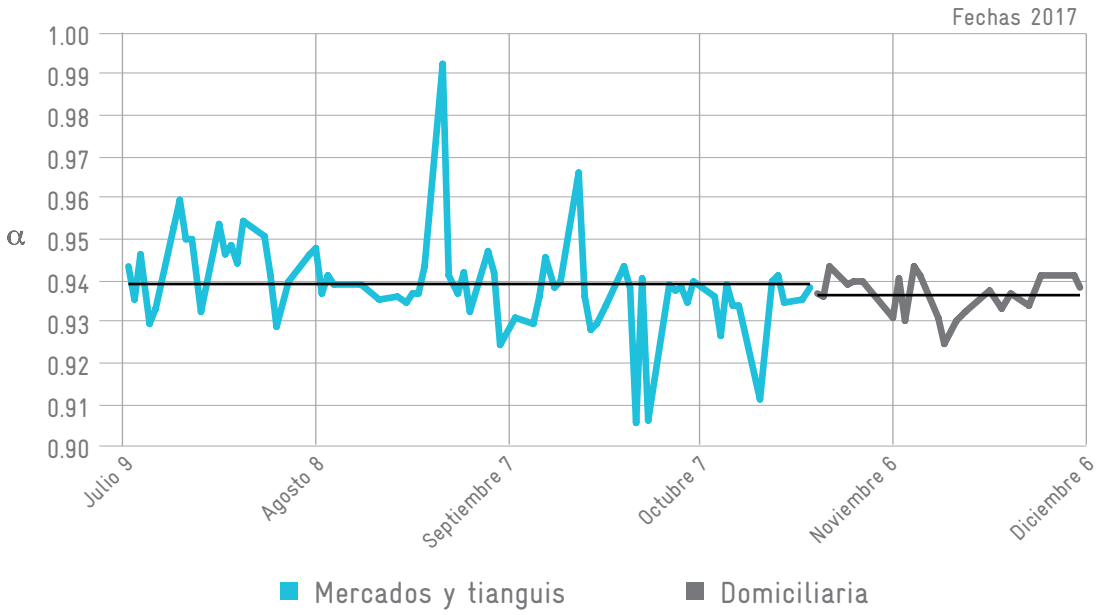
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

4.1.3. Valores de la acidez volátil y de la alcalinidad en la digestión anaeróbica húmeda

Otro valor importante que se debe tomar en cuenta para saber la estabilidad de un digestor anaérobico húmedo es el índice α que es el grado de acidificación. El índice α, es una determinación empleada para indicar el grado de acidificación de un sistema biológico anaerobio por un aumento en la concentración de AGV (Pérez y Torres, 2008). En el Anexo 8 se muestra la memoria de cálculo del índice α.

Es recomendable que el valor del factor α esté por arriba de 0.5, ya que al disminuir su valor aumentará la alcalinidad debida a AGV y, por lo tanto, el sistema tenderá a la acidificación. Entre más se acerque el valor de la relación α a la unidad más estable será el sistema. En el **GRÁFICO 13** se muestra el índice α dentro del digestor en esta etapa. Se observa que el valor promedio del índice α es de 0.94, esto quiere decir que los AGV generados por los residuos alimentados están siendo neutralizados con los bicarbonatos presentes en el inoculo (digestatos) del reactor. Por lo tanto, el digestor tiene la capacidad de ser alimentado todos los días.

GRÁFICO 13 Índice de alcalinidad alfa (α) en el digestor anaeróbico húmedo



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

4.1.4. Cuantificación y caracterización del biogás producido

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), pero también contiene diversas impurezas, siendo la principal el H_2S. La cantidad y composición del biogás producido depende del sustrato degradado.

Durante la operación de la 3PBg se realizaron muestreos diarios de biogás para determinar el flujo y calidad de este. La **TABLA 8** presenta las cantidades y composición de biogás producido en el reactor de digestión anaeróbica húmeda.

Con respecto al contenido de H_2S en el biogás producido, las lecturas que se realizaban tres veces al día a la salida del reactor siempre estuvieron por arriba del límite de detección de los detectores de campo, que es de 1000 ppm, y aunque el valor representa apenas el 0.1 % de la composición del biogás, la concentración es extremadamente peligrosa para las personas. Afortunadamente, los sistemas de depuración de biogás de la 3PBg permiten reducir la concentración de H_2S por debajo de 3 ppm, lo cual es un valor seguro para las personas y para el funcionamiento del equipo de generación eléctrica.

TABLA 8 **Biogás generado en el digestor anaeróbico húmedo (valores promedio)**

Tipo de FORSU	Composición		Volumen	
	CH_4	CO_2	Producción [Nm^3/t de FORSU]	Rendimiento [Nm^3/t de SV]
Mercados y tianguis	57 %	23 %	74	634
Domiciliaria	61 %	22 %	76	341

Nota: Los metros cúbicos de biogás generado reportados son normalizados.

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

La **TABLA 9** presenta los resultados del análisis estadístico de los porcentajes de composición de biogás en las dos etapas experimentales del proyecto. Se observa que los porcentajes de metano encontrados en el biogás producido son aceptables de acuerdo a los valores típicos reportados en la literatura, siendo deseable en todos los casos obtener un porcentaje de metano superior a 60 %. El menor porcentaje de metano se obtuvo cuando el digestor anaeróbico húmedo procesaba FORSU de mercados y tianguis (47 %) y el mayor porcentaje (70 %) se obtuvo cuando se procesaba la de tipo domiciliaria.

TABLA 9 **Parámetros estadísticos de los valores de porcentaje de metano (CH_4) en el biogás producido**

Parámetro	FORSU mercados y tianguis	FORSU domiciliarios
Desviación estándar	4 %	7 %
Moda	56 %	60 %
Mínimo	47 %	48 %
Máximo	69 %	70 %

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

En diversas fuentes bibliográficas se reporta que la composición del biogás, producto de la digestión anaeróbica, se encuentra en el intervalo de 50 a 70 % de CH_4 y de 30 a 40 % de CO_2, en volumen [17]. El porcentaje de CH_4 obtenido en la operación de la planta, a partir del tratamiento anaeróbico de los residuos, es muy similar y se encuentra en el porcentaje reportado en literatura. Esto indica que la FORSU generada en el municipio de Naucalpan de Juárez presenta un potencial de generación de CH_4 aceptable y, por lo tanto, se visualiza factible aprovechar la FORSU de este municipio para la obtención de biogás y posterior producción de energía. Lo cual conllevaría a una considerable disminución de la cantidad de residuos que se disponen en rellenos sanitarios y, por ende, una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

La **TABLA 10** presenta información de algunos de los principales tecnólogos a nivel internacional en sistemas de digestión anaeróbica de FORSU. A partir de los datos contenidos en esta tabla se observa que los valores de producción de biogás obtenidos en el reactor de digestión anaeróbica húmeda de la 3PBg (76 m^3/t FORSU) son cercanos a los reportados para instalaciones a escala industrial o municipal (72-200 m^3/t FORSU). Por supuesto, es importante tener en cuenta que los tecnólogos probablemente reportan los mejores resultados que han obtenido en las múltiples plantas con las que cuentan, y que los residuos procesados pueden ser muy diferentes, no sólo en cada país si no en cada ciudad.

TABLA 10 **Características de los principales procesos comerciales**

Proceso	País de origen	Húmeda	Seca	Tiempo de retención (TRH) (días)	Producción de biogás (m^3/tonelada de FORSU)
BEKON	Alemania		✓	28-35	72
BTA	Alemania	✓		13-15	80-120
Dranco	Bélgica		✓	15-30	100-200
Kompogas	Suiza		✓	15-20	105-130
Ros Rosca	España	✓	✓	25-30	120
Linde KCA	Alemania	✓		16	90-130
Linde BRV	Alemania		✓	18-25	100
Valorga	Francia		✓	25	80-160

Fuente: elaborado por la Facultad de Química de la UNAM, a partir de datos encontrados en las páginas electrónicas de cada uno de los tecnólogos.

Como es conocido, los tiempos de retención hidráulicos (TRH) de las tecnologías húmedas son más cortos comparados con las tecnologías secas; siendo el TRH promedio en los procesos por vía húmeda de 15 días, mientras que en los procesos por vía seca el promedio es de 25 días.

4.1.5. Generación eléctrica

Existen diversas opciones para la utilización del biogás obtenido en plantas de digestión anaeróbica que procesan FORSU, las principales son para producción de energía eléctrica en ciclos combinados o para la inyección en líneas municipales de gas natural, para su posterior uso doméstico, industrial o de transporte. En el caso de la 3PBg, el biogás se emplea actualmente en la generación de energía eléctrica, con una visión de tipo demostrativo y no como un fin en sí mismo. Ya se visualiza dotar a la 3PBg de un sistema de enriquecimiento de biogás para su posterior compresión y envasado, con el fin de utilizar el biogás en instalaciones universitarias como gas combustible.

Es importante mencionar que la 3PBg cuenta con un solo sistema de almacenamiento de biogás en el que se mezclan las corrientes de biogás provenientes tanto del digestor anaeróbico húmedo como de los secos. Posteriormente, el biogás pasa por una trampa de condensados y por dos columnas de eliminación de H_2S por reacción química con un material ferroso. El biogás así depurado es suministrado al generador eléctrico el cual cuenta con un motor de combustión interna. En la **TABLA 11** se muestra la generación de energía eléctrica por tipo de FORSU.

En el Anexo 7 se muestra la metodología empleada para determinar los valores de generación eléctrica con el biogás producido a partir de los distintos sustratos.

En la **TABLA 11** también se aprecia que con el biogás producido con la FORSU domiciliaria se ha generado 3.2 % más energía por tonelada de residuos que con respecto al caso de la FORSU de mercados y tianguis. No se trata de una diferencia significativa, pero puede atribuirse a que estos residuos tienen un mayor porcentaje de SV (22.23 %) con respecto a la FORSU de mercados y tianguis (11.6 %), es decir, la cantidad de materia orgánica susceptible de ser transformada en biogás y posteriormente en energía eléctrica es mayor por tonelada de residuos domiciliarios con respecto a los residuos de mercados y tianguis.

TABLA 11 **Generación de energía eléctrica por tipo de FORSU**

FORSU	Electricidad generada (kWh/t)
Mercados y tianguis	109.60
Domiciliaria	113.22

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

4.2. Digestión anaeróbica seca

El sistema de digestión seca en la 3PBg está integrado por tres digestores RBS-01 A/B/C, cada uno tiene un volumen de 3 m^3, los cuales tienen una capacidad para tratar 1400 kg de residuos orgánicos (**GRÁFICO 14**).

En este estudio, el programa de suministro de FORSU para el proceso de digestión anaeróbica seca se estableció como resultado de distintas reuniones realizadas entre el personal de la Dirección General del Medio Ambiente de Naucalpan de Juárez, personal técnico de GIZ y personal de la Facultad de Química de la UNAM. En el programa de suministro se estableció que la FORSU se proporcionaría los días 13, 18 y 25 de octubre de 2017 y se trataría únicamente la domiciliaria. Sin embargo, la dificultad en la selección de la fracción orgánica de este tipo de sustratos, así como inconvenientes en la logística de recolección y transporte por parte de la Dirección General de Servicios Públicos de Naucalpan de Juárez causó que el suministro de FORSU se programara los días 9 y 16 de noviembre de 2017, considerando FORSU de mercados y tianguis, así como domiciliaria, respectivamente. La cantidad de suministrado a la 3PBg fue de 1356 kg de FORSU de mercados y tianguis y 1010 kg de FORSU domiciliaria.

GRÁFICO 14 **Módulos de digestión seca de la 3PBg**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

La alimentación de la FORSU al sistema de digestión seca se realizó de forma manual, tomando en cuenta un tamaño partícula de 50 mm del residuo orgánico y una relación FORSU-inóculo dos a uno con base en SV. El inóculo consistió en digestato deshidratado proveniente del reactor de digestión anaeróbica húmeda. El tiempo de retención hidráulico para el sistema de digestión seca

es de 42 días. Es importante mencionar que para obtener resultados más confiables de generación de biogás para el sistema de digestión seca es necesario realizar cuando menos tres ciclos consecutivos de alimentación, con la finalidad de adaptar el inoculo (microorganismos) al sustrato suministrado. En este estudio, debido al ajuste en las fechas de suministro de FORSU sólo se realizó un ciclo de alimentación al sistema de digestión seca, esto no permitió la adaptación de los microorganismos al sustrato alimentado y, por consecuencia, la generación de biogás fue muy baja y los rendimientos bajos, además de que se obtuvo un escaso contenido de CH_4 en el biogás.

La **TABLA 12** presenta las cantidades y composición de biogás producido en el reactor de digestión anaeróbica seca. En el caso de los digestores anaeróbicos secos, los resultados obtenidos durante el período de operación no son concluyentes, ya que la generación de biogás es muy baja y los rendimientos bajos, además de que se tiene un escaso contenido de CH_4 en el biogás. Esto se pudo deber, en gran medida, a que sólo se efectuó una carga de residuos orgánicos para cada tipo de sustrato, y que por lo tanto se requieren más ciclos de alimentación para lograr resultados más favorables en cuanto a la producción de biogás.

Una referencia sobre la producción de biogás que se puede alcanzar empleando el sistema de digestión seca de la 3PBg, es un estudio realizado en el año 2016, el cual tuvo la finalidad de evaluar la producción de biogás con sustratos provenientes de la Central de Abasto Tultitlán, del Estado de México. La FORSU proveniente de ella presentó un valor de 14.28 % de ST y si se compara con el valor de 12.78 % de ST reportado para la FORSU de mercados y tianguis provenientes del municipio de Naucalpan de Juárez, se aprecia que los valores son similares en cuanto a la cantidad de material biodegradable que puede ser aprovechado. Por lo tanto, el estudio de evaluación de la producción de biogás con sustratos provenientes de la Central de Abasto Tultitlan puede ser una referencia en cuanto al comportamiento y producción de biogás en el sistema de digestión seca. La **TABLA 13** presenta los valores de producción de biogás para el sistema de digestión seca empleando residuos de la Central de Abasto Tultitlan.

TABLA 12 Biogás generado en los digestores anaeróbicos secos (valores promedio)

Tipo de FORSU	Composición		Volumen	
	CH_4	CO_2	[Nm^3/t de FORSU]	[Nm^3/t de SV]
Mercados y tianguis	4 %	23 %	0.15	2
Domiciliarios	10 %	23 %	1.25	6

Nota: Los metros cúbicos de biogás generado reportados están normalizados.

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 13 Ejemplo de producción de biogás con sustratos de la Central de Abasto Tultitlan, del Estado de México

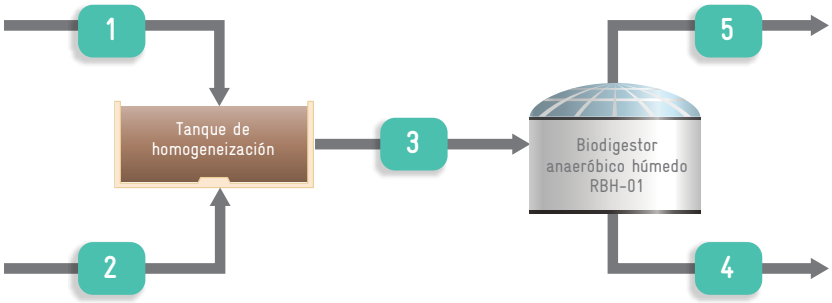
Tipo de digestión anaérobica	Producción [Nm^3/t de FORSU]	Rendimiento [Nm^3/t de SV]
Seca	31	239

Para el caso del estudio de generación de biogás para el municipio de Naucalpan de Juárez el valor de 31 m^3 de biogás/t reportado se debe tomar como base inferior en la producción de biogás para el sistema de digestión anaeróbica seca.

Fuente: Dr. Alfonso Durán Moreno.

Con base en los resultados de la operación de la 3PBg, se realizaron los balances de materia para el sistema de digestión húmeda con las FORSU de mercados y tianguis y domiciliaria. Estos balances de materia están referidos a un día de alimentación promedio, y la caracterización de cada corriente de proceso es el promedio reportado en la operación con cada sustrato, ya sea de mercados y tianguis o domiciliario.

GRÁFICO 15 Esquema simplificado y balance de la operación del digestor húmedo (FORSU de mercados y tianguis)



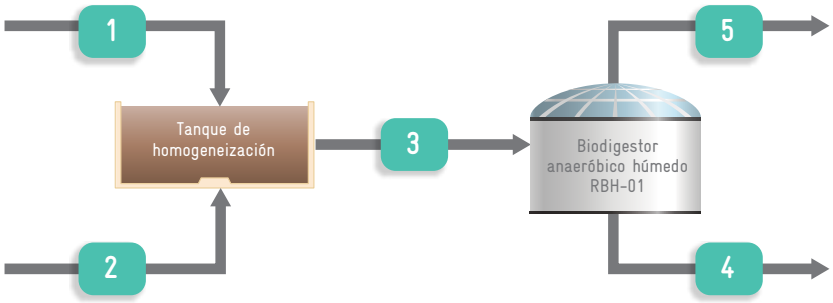
	Unidades	FORSU	Agua de dilución	FORSU diluida	Lodo	Biogás
Corriente	Número	1	2	3	4	5
Flujo	kg	422.9	258.6	681.5	648.1	33.5
Humedad	%(m/m)	87.2	100.0	92.1	98.1	
ST	%(m/m)	12.8		7.9	1.9	
SV	%(m/m)	11.6		7.2	1.0	
SF	%(m/m)	1.2		0.7	0.9	
DQO	gO_2/kg	294.1		182.5	149.4	
$N\text{-}NH_4^+$	g/kg	0.7		0.4	1.4	
P total	g/kg	25.2		15.6	2.8	
Alcalinidad	$gCaCO_3/kg$	4.5		2.8	7.8	
AGV	gCH_3COOH/kg	7.6		4.7	0.5	
CH_4	%(v/v)					57.1
CO_2	%(v/v)					23.3
N_2	%(v/v)					12.3
H_2S	%(v/v)					0.1
H_2O	%(v/v)					7.3

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

El **GRÁFICO 15** muestra el esquema de la operación del digestor anaeróbico húmedo. El residuo triturado se mezcla con agua para lograr las condiciones de humedad necesarias dentro del digestor (humedad ≥ 90 %); la mezcla resultante se alimenta al digestor húmedo, de este equipo salen dos corrientes, una de biogás y otra de digestato.

El **GRÁFICO 16** presenta los balances de materia para cada tipo de FORSU.

GRÁFICO 16 Esquema simplificado y balance de la operación del digestor húmedo (FORSU domiciliaria)



	Unidades	FORSU	Agua de dilución	FORSU diluida	Lodo	Biogás
Corriente	Número	1	2	3	4	5
Flujo	kg	373.5	292.7	666.1	636.5	29.6
Humedad	%(m/m)	74.4	100.0	85.7	97.6	
ST	%(m/m)	25.6		14.3	2.4	
SV	%(m/m)	22.2		12.5	1.4	
SF	%(m/m)	3.3		1.9	1.0	
DQO	gO_2/kg	228.1		127.9	104.7	
$N\text{-}NH_4^+$	g/kg	0.8		0.4	2.1	
P total	g/kg	28		15.7	5.1	
Alcalinidad	$gCaCO_3/kg$	3.7		2.1	8.1	
AGV	gCH_3COOH/kg	5.5		3.1	3.8	
CH_4	%(v/v)					60.6
CO_2	%(v/v)					20.9
N_2	%(v/v)					11.8
H_2S	%(v/v)					0.1
H_2O	%(v/v)					6.72

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

PRUEBA DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN CONTINUO CON UN DIGESTOR ANAERÓBICO HÚMEDO DE 5 LITROS

6

Adicional a los estudios realizados a nivel de la 3PBg y para complementar los análisis de las diferentes fuentes de la FORSU obtenida del municipio de Naucalpan de Juárez, se montó una prueba a nivel de laboratorio con una muestra representativa del residuo orgánico clasificado en este estudio como proveniente de grandes generadores.

Este estudio consistió en emular las condiciones existentes en la 3PBg para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos bajo una operación de digestión anaeróbica húmeda. La prueba se realizó en un reactor de vidrio con capacidad de 5 litros y doble pared, que garantizaba una temperatura constante en el rango de operación mesofílica de 35°C, mediante la circulación de agua proveniente de un calentador y haciendo uso de una bomba peristáltica para este propósito. Se realizó una agitación mecánica mediante un cabezal externo que permitía el mezclado de la FORSU con el inóculo, además, el reactor contaba con salidas para toma de muestras, tanto del digestato como del biogás producido durante el período de la digestión de la FORSU de grandes generadores, así como un ducto adaptado para la alimentación o entrada del sustrato. En el **GRÁFICO 17** se observa la configuración del reactor.

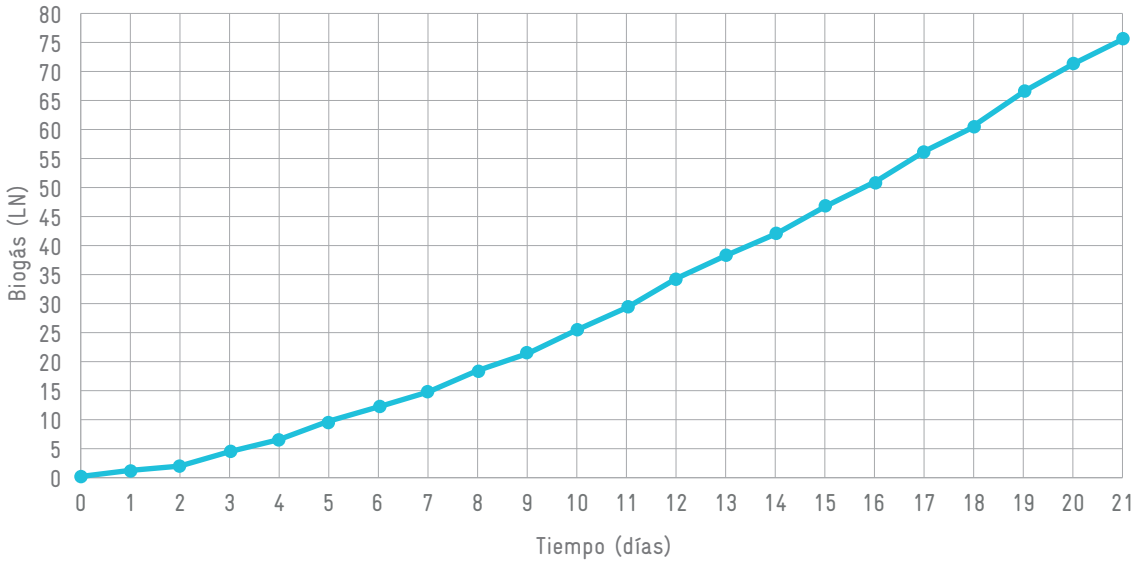
GRÁFICO 17 **Configuración de reactor de 5 litros para tratamiento de FORSU de grandes generadores a nivel laboratorio**

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

El período de la digestión se fijó en 21 días, que corresponde con el tiempo de retención hidráulico para el cual está diseñada la 3PBg para la tecnología de digestión húmeda y es un período adecuado para conocer el comportamiento del sustrato bajo condiciones controladas de temperatura y alcalinidad. La alimentación de sustrato al reactor se realizó tres veces por semana con 50 g de FORSU de grandes generadores para tener al final del estudio una relación en masa de 2 a 1 de inóculo a sustrato. Se garantizaron condiciones anaeróbicas inertizando el reactor con gas nitrógeno y diariamente se registró la producción de biogás.

En el **GRÁFICO 18** se observa la producción de biogás con una alimentación continua que simula las condiciones empleadas en la 3PBg. También se aprecia que la producción de biogás presenta una pendiente positiva y con una tendencia estable bajo el régimen de alimentación empleado, llegando a producir 76 LN durante el período de digestión. La producción específica de biogás de la muestra de grandes generadores fue de 168 LN/kg FORSU que corresponde al 103 % de la generación obtenida en la prueba de PBM a nivel laboratorio, esto respalda los resultados de dicha prueba y confirma la alta biodegradabilidad del residuo debido a su composición de materia orgánica. La producción específica por contenido de SV fue de 1279 LN/kg SV FORSU, que representa la producción de biogás por cada kilogramo potencialmente biodegradable de residuos orgánicos de grandes generadores.

GRÁFICO 18 **Producción acumulada de biogás para el reactor de 5 litros con FORSU de grandes generadores**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

De manera paralela a la cuantificación de biogás se caracterizó su producción, obtenida del proceso de digestión anaeróbica húmeda de la FORSU de grandes generadores, reportando los valores composicionales de los tres gases más importantes presentes en el proceso (CH_4, CO_2 y H_2S). Los valores de composición promedio del biogás, reportados por la prueba realizada a la FORSU de grandes generadores en el reactor de 5 litros a nivel laboratorio para una digestión anaeróbica húmeda, son muy semejantes a los obtenidos en la 3PBg para las FORSU domiciliaria y de mercados y tianguis bajo la misma tecnología de digestión, presentando un contenido de CH_4 2 % mayor con respecto a los residuos orgánicos de mercados y tianguis y 5 % menor con respecto a FORSU domiciliaria (**TABLA 14**).

TABLA 14 **Composición promedio del biogás para FORSU de grandes generadores**

Tipo de digestión anaérobica	Origen del sustrato	CH_4	CO_2	H_2S
Húmeda	Grandes generadores	58 %	23 %	0.1 %

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

En el año 2013, la Facultad de Química de la UNAM realizó el proyecto "Generación de un sistema piloto de tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM)" con numero 174710 FORDECYT. En este proyecto se evaluaron tecnologías de digestión anaeróbica a nivel internacional, con la finalidad de valorar las ventajas e inconvenientes de los procesos comerciales de digestión anaeróbica. Esta información puede ser una herramienta de apoyo adicional en la toma de decisión del sistema de digestión anaeróbica considerado para ser empleado en el municipio de Naucalpan de Juárez.

7.1. Método de evaluación multicriterio

El método PROMETHEE se empleó para realizar la evaluación de tecnologías de digestión anaeróbica.

Los métodos PROMETHEE I (*ranking* parcial) y II (*ranking* completo) fueron desarrollados por J. P. Brans y presentados por primera vez en 1982 en Quebec, Canadá. Pocos años después, el mismo Brans junto con B. Mareschal desarrollaron PROMETHEE III (basado en intervalos) y PROMETHEE IV (continuo). Estos mismos autores propusieron en 1988 el módulo visual interactivo GAIA, que proporciona una magnífica representación gráfica de la metodología PROMETHEE. En 1992 y en 1994, sugirieron dos extensiones: PROMETHEE V (con restricciones de segmentación) y PROMETHEE VI (representación del cerebro humano) [19].

El método PROMETHEE está basado en comparaciones por parejas. Los criterios de preferencia agregados y los flujos de *outranking* son las claves de esta metodología.

Teniendo las alternativas a,b pertenecientes a un conjunto A, y sabiendo que P_j y w_j son las funciones de preferencia y ponderaciones de los criterios, respectivamente:

$$\begin{cases} \pi(a,b) = \sum_{j=1}^{k} P_j(a,b) w_j \,, \\ \pi(b,a) = \sum_{j=1}^{k} P_j(b,a) w_j \,. \end{cases} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde $\pi(a,b)$ expresa el nivel en que a es preferido sobre b para todos los criterios, y $\pi(b,a)$ el nivel de preferencia de b sobre a De estas definiciones se derivan las siguientes propiedades para todas las alternativas a,b que pertenezcan a A:

$$\begin{cases} \pi(a,a) = 0, \\ 0 \leq \pi(a,b) \leq 1, \\ 0 \leq \pi(b,a) \leq 1, \\ 0 \leq \pi(a,b) + \pi(b,a) \leq 1. \end{cases}$$

Por lo tanto; cuando $\pi(a,b) \sim 0$, implica una preferencia global débil de a sobre b, y cuando $\pi(a,b) \sim 1$ implica una preferencia global fuerte de a sobre b [7].

Cada alternativa a es evaluada contra $(n-1)$ alternativas en A. Por lo que se definen los siguientes flujos de *outranking*:

- Flujo positivo de *outranking*:

$$\phi^{+}(a)=\frac{1}{n-1}\sum_{x\in A}\pi(a,x) \qquad \text{Ecuación 2}$$

- Flujo negativo de *outranking*:

$$\phi^{-}(a)=\frac{1}{n-1}\sum_{x\in A}\pi(x,a) \qquad \text{Ecuación 3}$$

El flujo positivo expresa que una alternativa a domina a todas las demás (potencia). El flujo negativo expresa que una alternativa a es superada por todas las demás (debilidad) [7]. El *ranking* parcial de PROMETHEE I se obtiene de la intersección de los flujos positivos y negativos de *outranking*. Este método trata de ser prudente; puesto que no va a decidir qué alternativa es mejor cuando se presenta que a es buena con base en un conjunto de criterios en que b es débil, y por el contrario, b es buena en otros criterios en donde a es débil. El factor de decisión, también conocido como DM por sus siglas en inglés (*decision maker*) es quien asume esta responsabilidad.

Por otro lado, el PROMETHEE II consiste en el *ranking* completo, para lo que se considera el flujo neto de *outranking*:

$$\phi(a)=\phi^{+}-\phi^{-}(a) \qquad \text{Ecuación 4}$$

Este flujo ϕ consiste en el balance entre los flujos positivos y negativos de *outranking*; cuanto mayor sea el flujo neto, mejor es la alternativa. Cuando se utiliza este método completo, todas las alternativas deben ser comparables. El *ranking* completo es fácil de usar, pero el análisis de las alternativas incomparables ayuda a completar una decisión adecuada. Debido a que ϕ proporciona un *ranking* completo, puede ser comparado con la función de la Utilidad Multiatributo (UMA), con la ventaja que ϕ se construye con base en información de preferencia clara y simple, y está basado en comparaciones en lugar de evaluaciones absolutas [7].

Por su parte, el módulo interactivo visual GAIA es un plano cuya proyección preserva la mayor cantidad de información. Según la técnica de análisis de componentes principales, este es el plano definido por dos vectores propios correspondientes a los dos mayores propios de la matriz de los flujos netos de cada criterio.

El módulo PROMETHEE VI provee al DM información adicional sobre su propia visión particular del problema multicriterio; pues permite apreciar si el problema en cuestión es fácil o difícil de acuerdo con su opinión personal, puesto que en muchas ocasiones el DM duda acerca de los valores precisos a asignar.

7.1.1. Visual PROMETHEE

Visual PROMETHEE es un programa de cómputo de ayuda para realizar las evaluaciones multicriterio. Está diseñado para:

- Evaluar diversas posibles decisiones o alternativas para múltiples criterios.
- Identificar la posible mejor opción.
- Calificar las posibles alternativas, desde la mejor hasta la peor.
- Clasificar alternativas en clases predefinidas.
- Visualizar problemas de decisión o evaluación, para entender mejor las dificultades y tomar mejores decisiones.
- Justificar o invalidar decisiones basadas en elementos objetivos.

Este *software* fue desarrollado por Bertrand Mareschal de la Universidad de Bruselas, es una nueva versión de los programas PromCalc y Decision Lab creados en los años 2000 y 2010, respectivamente.

7.2. Evaluación multicriterio de las tecnologías de digestión anaeróbica

7.2.1. Diagrama Jerárquico

Para comenzar con la evaluación multicriterio, se plantearon los factores relevantes que permiten calificar el desempeño de las tecnologías evaluadas. Por lo tanto, se estableció un diagrama jerárquico partiendo del objetivo principal, el cual es la selección de la o las tecnologías de digestión anaeróbica más adecuadas para tratar la FORSU.

Para iniciar, se establecieron los grupos principales: Grupo de Criterios Técnicos y Grupo de Criterios Económicos. Se planteó la inclusión del Grupo Criterios Ambientales para evaluar los impactos de cada proceso al ambiente, tomando en cuenta sus emisiones de equivalentes de CO_2, la cantidad de agua utilizada en el proceso y los contaminantes expulsados al suelo a través del postratamiento, sin embargo, no se cuenta con la información específica suficiente de cada tecnología que permita realizar un comparativo entre todas ellas, puesto que las compañías no publican ni reportan estos datos.

Posteriormente, el Grupo Criterios Técnicos fue dividido en Rendimiento, Operación y Tratamientos, mientras que para el Grupo Criterios Económicos sólo se tomó en cuenta la división de Costos.

En el **GRÁFICO 19** se presenta el diagrama jerárquico que representa este problema de evaluación multicriterio.

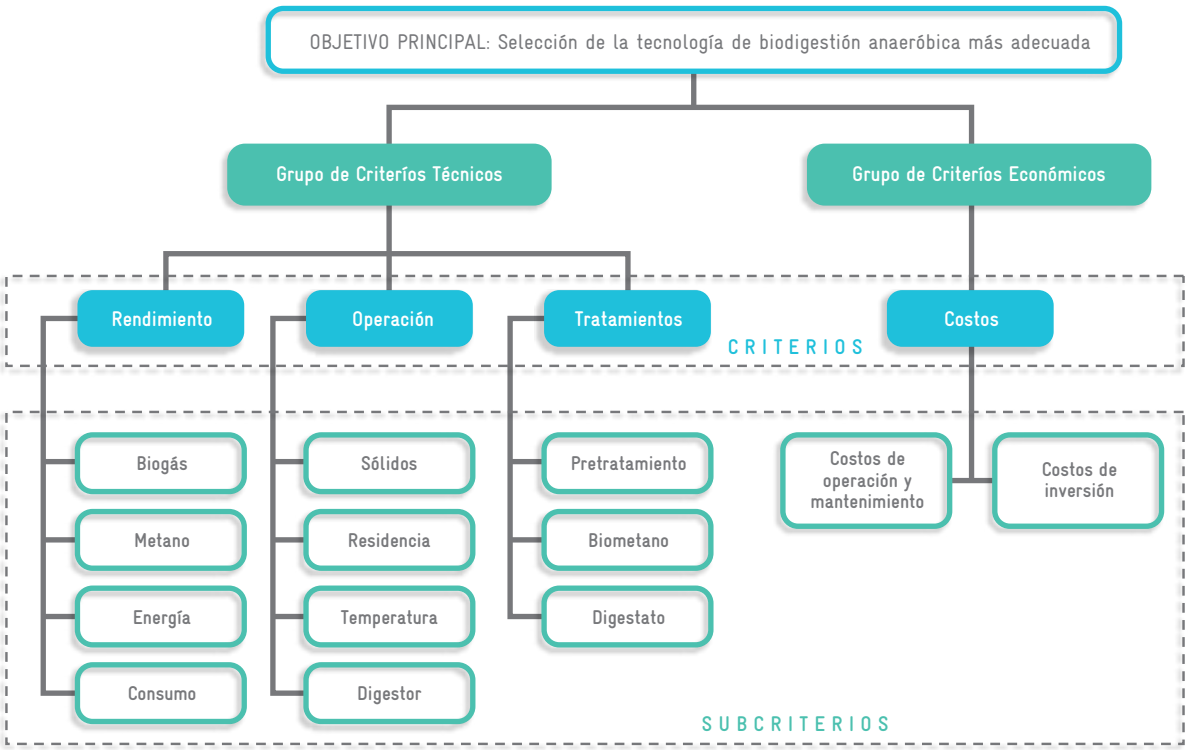
7.2.2. Definición y ponderación de los criterios y sus variables

La definición de criterios se llevó a cabo por niveles, primero se realizó la ponderación de peso a los grupos de criterios, posteriormente a los criterios y, por último, a los subcriterios.

Dentro del Grupo de Criterios Técnicos se consideraron las siguientes divisiones:

- **Rendimiento.** Expresa la capacidad de cada tecnología para convertir la FORSU en productos de la digestión anaeróbica con alto valor agregado.
- **Operación.** Las características que cuantifican la dificultad para operarlo.
- **Tratamientos.** Tanto los que reciben los residuos orgánicos como los productos y subproductos producidos.

GRÁFICO 19 **Diagrama jerárquico para la evaluación multicriterio**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

La **TABLA 15** presenta la definición de los subcriterios que corresponden a cada criterio técnico recién descrito.

Para cada uno de los tres subcriterios con escala cualitativa se definió una relación de cinco niveles:

- **Digestor**: se definió la escala con base en la de complejidad de operación del digestor según sus etapas o mezclado y su continuidad (**TABLA 16**).
- **Pretratamiento**: se estableció una escala que cuantifica la complejidad del pretratamiento que requieren los residuos orgánicos para que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente, según el número de secciones que típicamente presenta una planta de cada tecnología (**TABLA 17**).
- **Digestato**: se estableció la escala de calificación, basada en una evaluación que realizó el Gobierno Alemán, en la que evalúa la calidad del subproducto según los tratamientos que recibe después del proceso de digestión anaeróbica (**TABLA 18**).

El Grupo de Criterios Económicos derivó en Costos y este rubro en subcriterios de Costos de Inversión y de Costos de Operación y Mantenimiento, para ellos se consideró el costo de la tecnología tomando como referencia la inversión total que en duranpromedio se realiza para cada una, según las toneladas de residuos orgánicos que degrada al año y también se tomaron en cuenta los gastos por la operación y el mantenimiento del sistema por residuo tratado al año (**TABLA 19**). Para este último, no se encontró información suficiente directa de los tecnólogos, por lo que se recurrió a un estimado a partir de un porcentaje de la inversión de la planta según el tipo de proceso de digestión anaérobica (húmeda, seca, continua y por lotes) [28].

TABLA 15 Grupo de Criterios Técnicos: Descripción de criterios y subcriterios

Subcriterios	Descripción	Tipo de escala
	Rendimiento	
Biogás	Producción de biogás en Nm^3 por tonelada de residuo tratado	Cuantitativa
Metano	Producción de metano en Nm^3 por tonelada de residuo tratado	Cuantitativa
Energía	Generación de energía eléctrica en kWh por tonelada de residuo tratado	Cuantitativa
Consumo	Consumo de energía eléctrica por tonelada tratada de residuo	Cuantitativa
	Operación	
Sólidos	Porcentaje máximo permisible de ST a la entrada del digestor	Cuantitativa
Residencia	Tiempo de residencia de operación del digestor en días	Cuantitativa
Temperatura	Temperatura de operación del digestor en °C	Cuantitativa
Digestor	Cuantifica la dificultad de operación del digestor según sus etapas, su mezclado y su continuidad	Cualitativa
	Tratamiento	
Pretratamiento	Cuantifica la dificultad del pretratamiento según el número de secciones que posee	Cualitativa
Biometano	Determina si la tecnología cuenta con la posibilidad de elevar el grado del biogás a biometano	Sí/No
Digestato	Cuantifica la calidad del tratamiento que recibe el digestato según el subproducto que ofrece cada tecnología	Cualitativa

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 16 Escala de complejidad del subcriterio 'digestor'

Escala	Descripción
Muy complejo	Inyección de biogás / Continuo
Complejo	Dos etapas / Continuo
Promedio	Recirculación / Continuo
Sencillo	Agitación mecánica / Continuo
Muy sencillo	Sin mezclado / Por lotes

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 17 Escala de complejidad del subcriterio 'pretratamiento'

Escala	Descripción
Muy complejo	Más de 5 secciones de pretratamiento
Complejo	5 secciones de pretratamiento
Promedio	3 secciones de pretratamiento
Sencillo	1 sección de pretratamiento
Muy sencillo	Sin pretratamiento

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 18 Escala de complejidad del subcriterio 'digestato'

Escala	Descripción
Muy malo	Sin tratamiento
Malo	Separación sólida/líquido
Promedio	Composta a tratamiento aeróbico
Bueno	Composta de alto grado
Muy bueno	Composta de alto grado y fertilizante líquido

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 19 Descripción de criterios económicos

Criterios	Descripción	Tipo de escala
Costos de Inversión	Es la inversión total del proyecto por tonelada de residuo tratada	Cuantitativa
Costos de Operación y Mantenimiento	Son los costos de operación y mantenimiento por tonelada tratada de residuo	Cuantitativa

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

7.2.3. Asignación de pesos específicos

El Grupo de Criterios Técnicos tiene mayor peso en esta evaluación debido a que considera aspectos que afectan directamente al Grupo de Criterios Económicos, además de que los datos encontrados para este último pueden variar significativamente para dos plantas de capacidad similar de una misma tecnología. La **TABLA 20** muestra la ponderación de los Grupos de Criterios utilizada en la evaluación.

TABLA 20 Ponderación de los Grupos de Criterios

Grupo	Criterio	Peso
Técnicos	Rendimiento	40 %
	Operación	30 %
	Tratamientos	30 %
	Subtotal	70%
Económicos	Costos	30 %
	Subtotal	30%
	Total	100%

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

Posteriormente, de los criterios técnicos se definió el peso de cada subcriterio (**TABLA 21**), comenzando por asignar ponderaciones, dando ligeramente mayor importancia a Rendimiento con un 40 %, y a Operación y a Tratamientos se les dio un 30 % a cada uno.

Por último, se definieron los pesos de los subcriterios del Grupo de Criterios Económicos (**TABLA 22**). En este caso se le asignó un mayor porcentaje al Costos de Inversión, debido a que es el que mayor impacto tiene en esta evaluación y a que los costos de operación se obtuvieron por medio de una aproximación, como se explicó anteriormente.

En la **TABLA 23** se muestra la matriz base que contiene los datos técnicos y económicos por cada tecnología específica, para la evaluación multicriterio con el programa de cómputo Visual PROMETHEE.

TABLA 21 **Ponderación de los subcriterios del Grupo de Criterios Técnicos**

Criterio	Subcriterio	Peso en cada criterio
Rendimiento	Biogás	25 %
	Metano	25 %
	Energía	30 %
	Consumo	20%
	Subtotal	40 %
Operación	Residencia	20 %
	Temperatura	30 %
	Sólidos	30 %
	Digestor	20 %
	Subtotal	30 %
Tratamientos	Pretratamiento	40 %
	Biometano	20 %
	Digestato	40 %
	Subtotal	30 %
	Total	100 %

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 22 **Ponderación de los subcriterios económicos**

Criterio	Subcriterio	Peso
Costos	Costos de Inversión	60 %
	Costos de Operación y Mantenimiento	40 %
	Total	100 %

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 23 **Matriz base para la evaluación multicriterio con Visual PROMETHEE**

				Tecnologías							
				Secas				Húmedas			
Criterios			Unidades	DRANCO	Kompogas	Valorga	BEKON	BTA	Ros Roca	Strabag	Weltec
Técnicos	Rendimiento	Biogás	Nm³/t	141	110	118	125	90	115	100	120
		Metano	Nm³/t	74	66	66	75	56	63	63	72
		Energía	kWh/t	206	236	348	206	203	202	240	208
		Consumo	kWh/t	40	52	173	21	20	12	120	10
	Operación	Residencia	d	21	18	25	19	15	20	21	17
		Temperatura	°C	53	57	55	37	37	38	37	55
		Sólidos	%	22	27	44	50	10	12	10.5	10
		Digestor		Sencillo	Promedio	Muy complejo	Muy sencillo	Complejo	Complejo	Muy complejo	Promedio
	Tratamientos	Pretratamiento		Complejo	Promedio	Complejo	Muy sencillo	Complejo	Promedio	Promedio	Promedio
		Biometano		NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI
		Digestato		Complejo	Muy bueno	Bueno	Bueno	Promedio	Muy bueno	Promedio	Promedio
Económicos	Costos	Costos de inversión	$USD año/t	467	570	438	476	531	489	446	325
		Costos de operación	$USD año/t	47	57	44	24	80	73	67	49

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

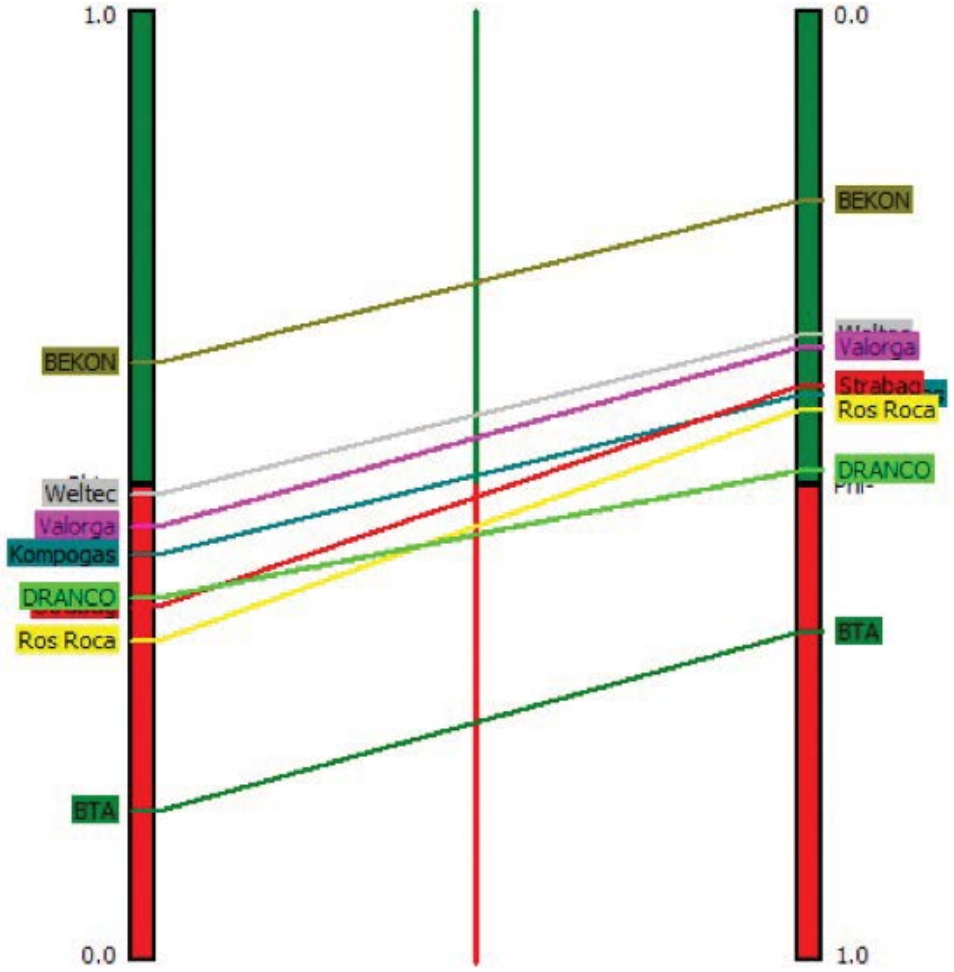
7.3. Resultados de la evaluación multicriterio de tecnologías

El **GRÁFICO 20** muestra los resultados de flujos de preferencia ϕ^+ (barra izquierda) y de ϕ^- (barra derecha), que se obtuvieron con el programa Visual PROMETHEE, el cual muestra un orden parcial de las alternativas. De este modo, se presenta que la alternativa mejor posicionada es BEKON y que la peor posicionada es BTA. En cuanto al resto de las alternativas, debido a que al pasar de ϕ^+ hacia ϕ^- las alternativas se cruzan (exceptuando a Weltec y Valorga, por muy poco), éstas se consideran nominalmente como 'incomparables', lo que implica que no se puede concluir de manera contundente que alguna tecnología sea superior.

El **GRÁFICO 21** muestra el flujo total de preferencia de las alternativas (el flujo neto $\phi = \phi^+ - \phi^-$). De esta forma, se evita que las alternativas resulten incomparables, aunque se pierde cierta información al realizarse el balance de ϕ. Lo que se observa en estos resultados es la diferencia que existe entre una y otra, desde la tecnología mejor posicionada que es BEKON con un flujo neto de 0.4143, hasta la de menor *ranking* que resulta ser BTA con -0.5374.

Esta diferencia se debe a que BEKON se desempeña mejor que las demás, en cuanto al contenido de CH_4 en el biogás, el menor consumo de energía eléctrica, el mayor contenido de ST permitido, una operación muy sencilla del proceso —no requiere un pretratamiento complejo— y demanda menos costos de operación y mantenimiento. Por el contrario, BTA resultó con la menor

GRAFICO 20 **PROMETHEE I - Ranking parcial**



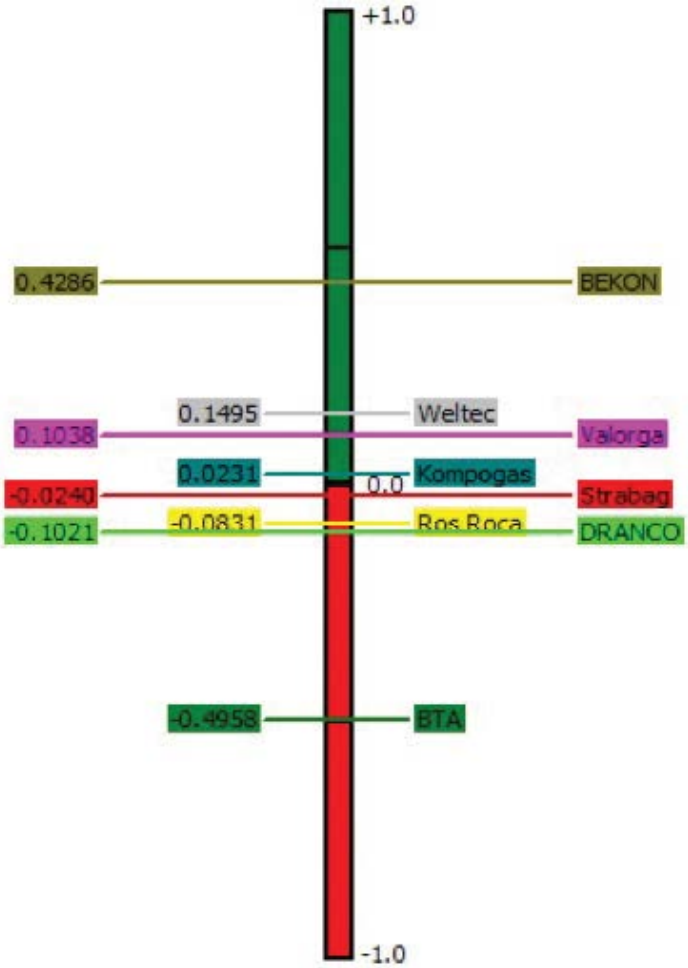
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

producción de biogás y CH_4, un pretratamiento complejo y, mayores costos de operación y mantenimiento, aunque, cabe señalar, esta tecnología puede llegar a ser utilizada con residuos mixtos, de donde se pueden obtener otros materiales valorizables, como metales.

También se puede observar la razón del porqué el resto de las alternativas resultaron incomparables, puesto que sus flujos se mostraron muy cercanos entre sí. No obstante, se puede obtener un orden definido respecto a su posicionamiento, que resulta ser el siguiente: Weltec, Valorga, Kompogas, Strabag, Ros Roca, y DRANCO.

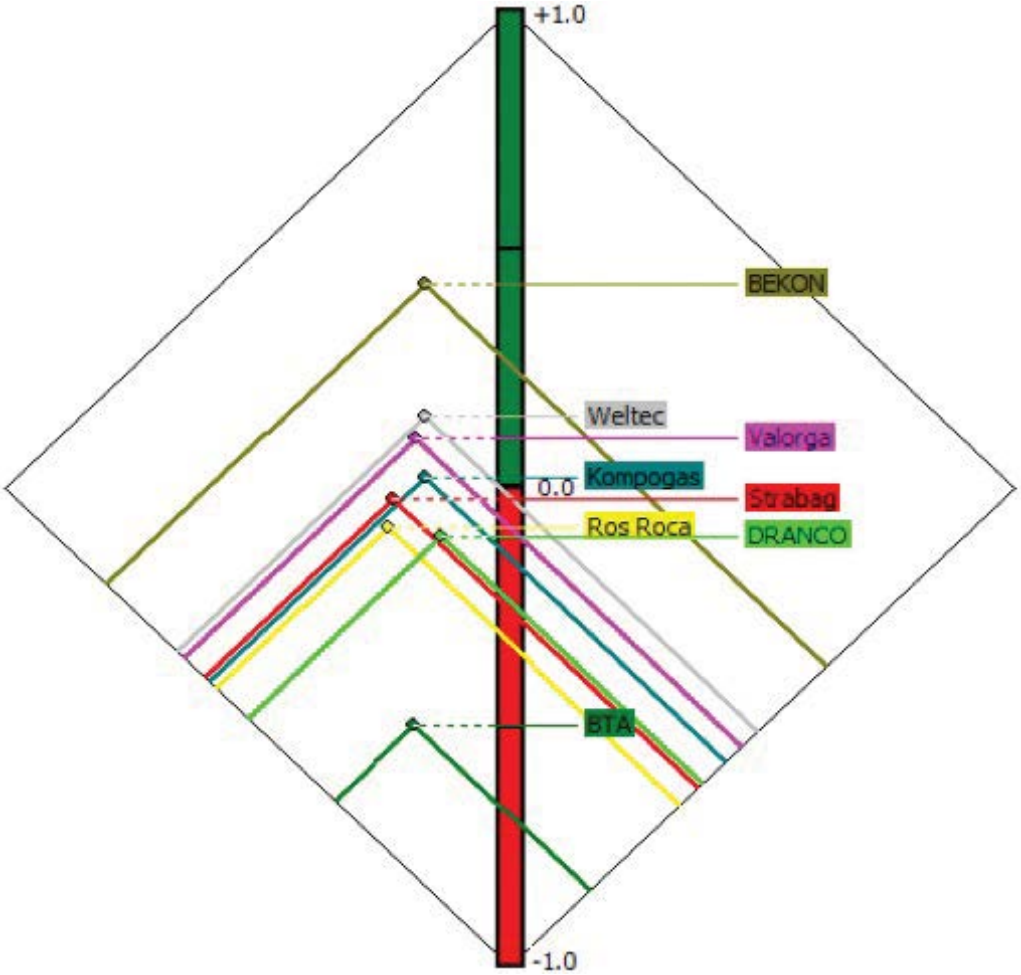
Para poder comparar en un mismo gráfico los rankings parcial y total (PROMETHEE I y PROMETHEE II), el *software* presenta un plano bidimensional en forma de diamante (**GRÁFICO 22**). En este gráfico se puede apreciar con mayor detalle cuales son las alternativas incomparables entre ellas, esto sucede cuando algún lado de los 'conos' de cada alternativa se cruza con otro de diferente alternativa, estas son: Kompogas-Strabag, Strabag-DRANCO, y Ros Roca-DRANCO; al mismo tiempo se observa el ordenamiento total de las alternativas cuando se proyecta una línea punteada al eje principal, tal y como se presentó en los resultados PROMETHEE II.

GRAFICO 21 **PROMETHEE II - Ranking completo**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRAFICO 22 **Diamante PROMETHEE**



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

En la **TABLA 24** y en el **GRÁFICO 23** se muestran los resultados de los flujos netos obtenidos para cada una de las tecnologías evaluadas. Dichos resultados se pueden visualizar de una forma más adecuada en la tabla, donde se observan las calificaciones que poseen cada una de las tecnologías. Lo que más resalta es la alternativa que obtuvo menor calificación (BTA), junto con las demás alternativas que también obtuvieron un ϕ total negativo (DRANCO, Ros Roca y Strabag), que resultaron ser incomparables en el *ranking* parcial.

Con la finalidad de comparar de forma conjunta las tecnologías húmedas frente a las tecnologías secas, se realizó un promedio de los resultados ϕ para las alternativas secas y otro para las alternativas húmedas, obteniéndose los resultados mostrados en la **TABLA 25** y en el **GRÁFICO 24**, en los que se observa que las tecnologías secas obtienen un promedio positivo en el flujo total, mientras que las tecnologías húmedas no lograron obtener un flujo total positivo.

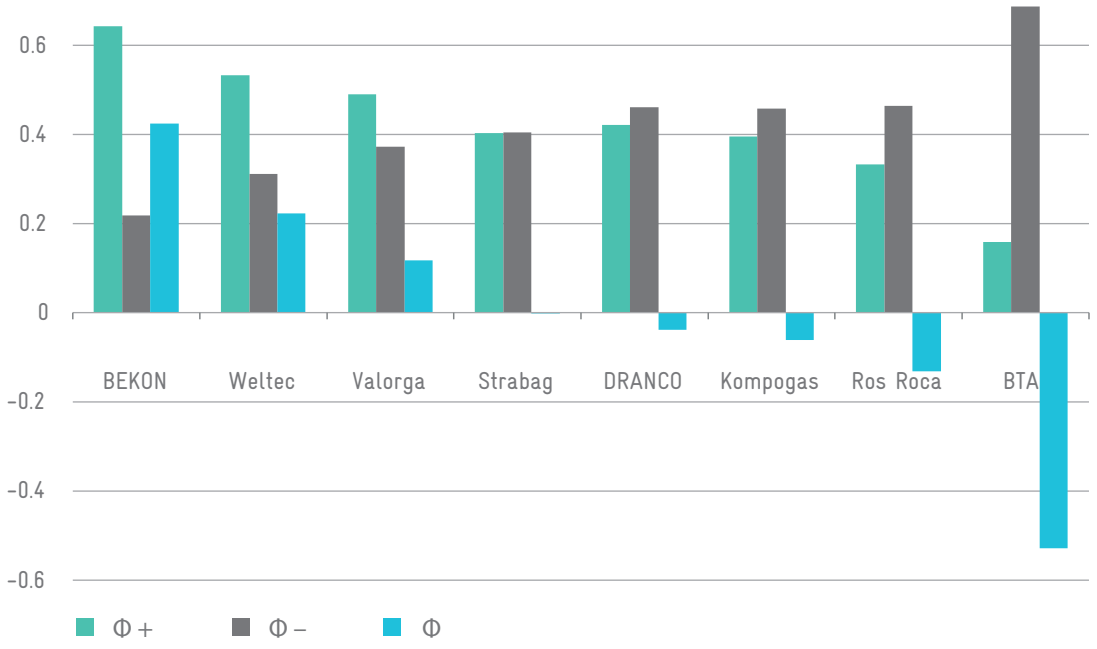
Esta diferencia que se aprecia entre cada conjunto de tecnologías, se debe principalmente a la influencia del flujo total de valores de ϕ, donde influyen significativamente tanto los resultados de BEKON como de BTA, puesto que ambas poseen valores de ϕ muy separados de las demás.

TABLA 24 **Flujos parciales y totales para cada una de las alternativas evaluadas**

Tecnología	Φ+	Φ-	Φ
Valorga	0.4579	0.3541	0.1038
DRANCO	0.3813	0.4834	-0.1021
Kompogas	0.4272	0.4042	0.0231
BEKON	0.6291	0.2006	0.4286
BTA	0.1577	0.6535	-0.4958
Weltec	0.4903	0.3408	0.1495
Ros Roca	0.3373	0.4204	-0.0831
Strabag	0.3726	0.3965	-0.0240

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRÁFICO 23 **Flujos parciales y totales de cada una de las tecnologías evaluadas**



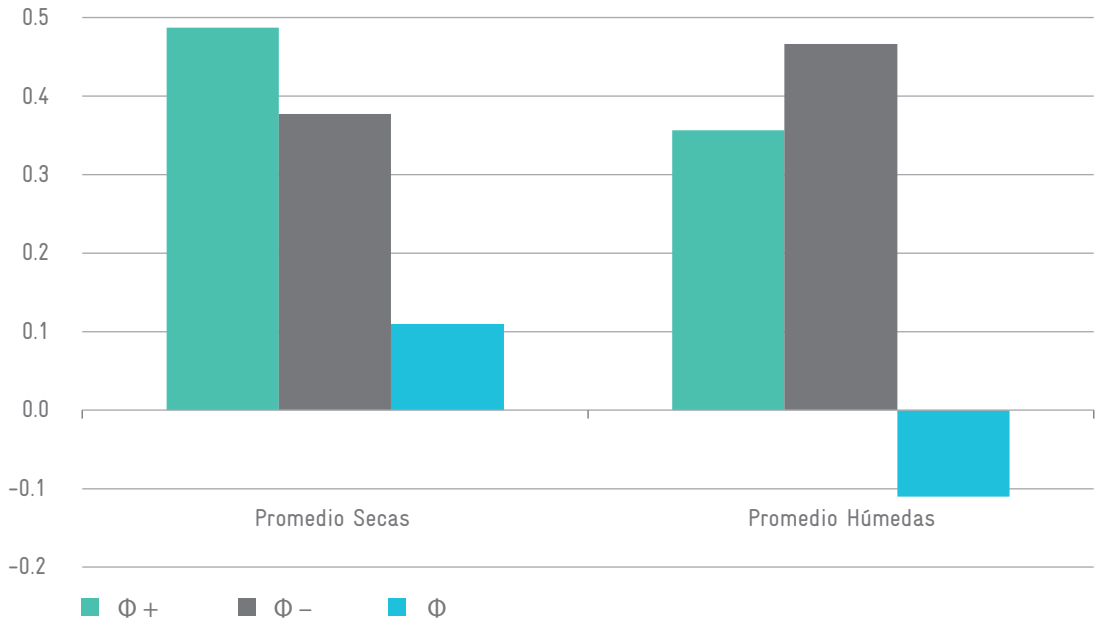
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

TABLA 25 **Flujos parciales y totales promedio para cada tecnología (promedio)**

Tecnologías	Φ+	Φ-	Φ
Secas	0.4739	0.3606	0.1133
Húmedas	0.3395	0.4528	-0.1133

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

GRÁFICO 24 **Flujos parciales y totales promedio para las tecnologías secas y húmedas**



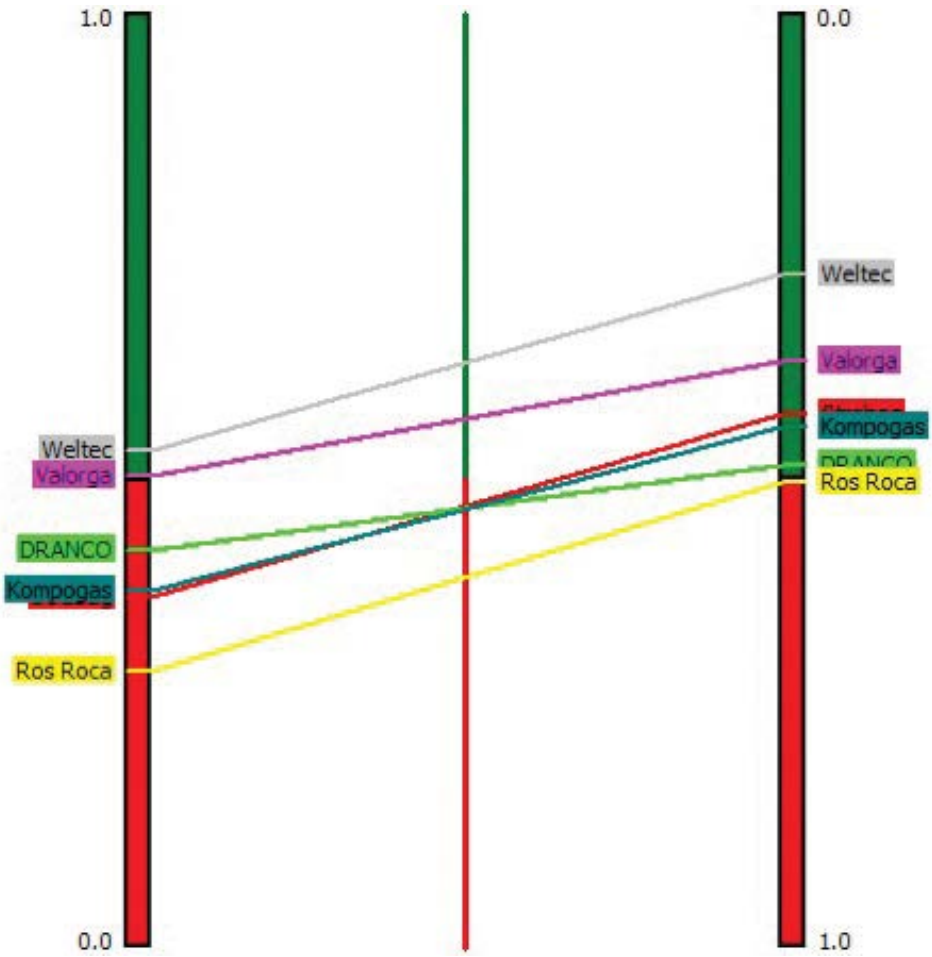
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

No obstante, estas tecnologías cuentan con ciertas características que no pudieron ser evaluadas de forma global con las demás, ya que algunos factores no aplican en las restantes o no se cuenta con la suficiente información para integrarlo a la evaluación. Por ejemplo, en el caso de BEKON, los impactos que pueden causar la carga y descarga del digestor de forma intermitente, aunado a cuestiones adicionales de seguridad por este tipo de maniobras, podrían llegar a influir en la puntuación final de la tecnología, disminuyéndola en este caso. Por otra parte, en el caso de BTA, el pretratamiento más complejo de la tecnología que impacta de forma negativa en la evaluación, está también ligado a la flexibilidad de este proceso para dar tratamiento a residuos con una elevada fracción de materiales inorgánicos, los cuales pueden llevar a una mayor recuperación de materiales reciclables, por lo que este factor podría aumentar la calificación de esta tecnología.

Debido a lo anterior, se realizó un análisis adicional dejando fuera éstas últimas dos tecnologías, con el objetivo de tener un panorama más conciso en la comparación de las tecnologías húmedas contra las secas.

Al dejar fuera de la evaluación a las tecnologías mencionadas anteriormente, los resultados que el *software* presentó no variaron significativamente para cada una de las tecnologías restantes, como se observa en el **GRÁFICO 25**, donde esta vez, las tecnologías que resultaron incomparables entre sí, y entonces hasta cierto punto equivalentes, fueron DRANCO, Strabag y Kompogas, quedando ligeramente por encima de ellas una tecnología húmeda (Weltec) y una seca (Valorga).

GRAFICO 25 **PROMETHEE I - Ranking parcial sin tomar en cuenta las tecnologías BEKON y BTA**



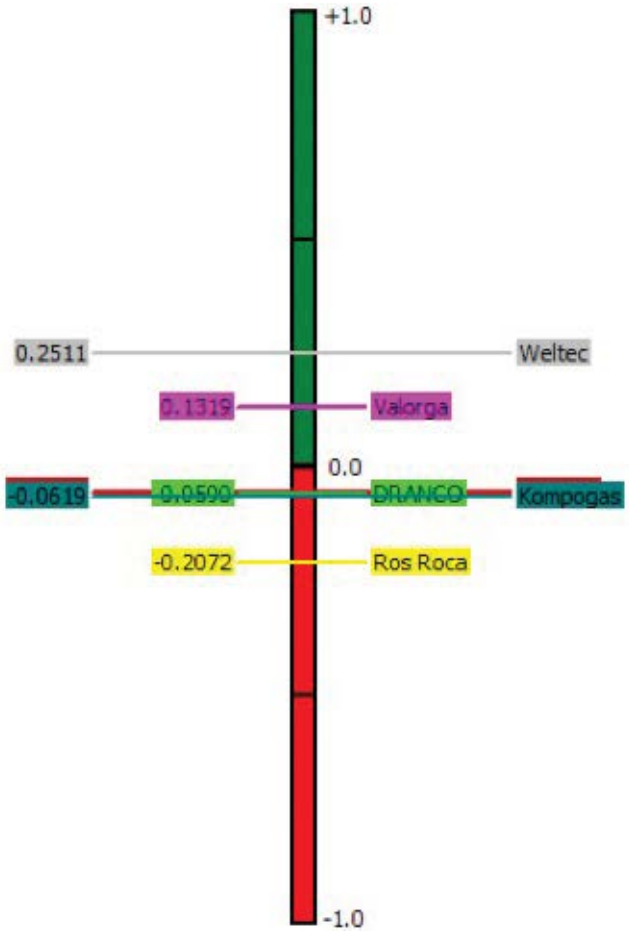
Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

Por otra parte, en el **GRÁFICO 26** se observa el orden en que resultaron calificadas las tecnologías de mayor a menor calificación, y que es el siguiente: Weltec, Valorga, Strabag, DRANCO, Kompogas y Ros Roca.

Con estos flujos ϕ, se calculó un promedio para las tecnologías secas y para las húmedas, obteniendo los resultados mostrados en la **TABLA 26**.

En el **GRÁFICO 27** se puede observar que esta vez la diferencia entre tipo de tecnología (seca húmeda), no es tan amplia, incluso las tecnologías húmedas obtienen un flujo ϕ total positivo y ligeramente mayor que las secas.

GRAFICO 26 PROMETHEE II - Ranking completo sin tomar en cuenta las tecnologías BEKON y BTA



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

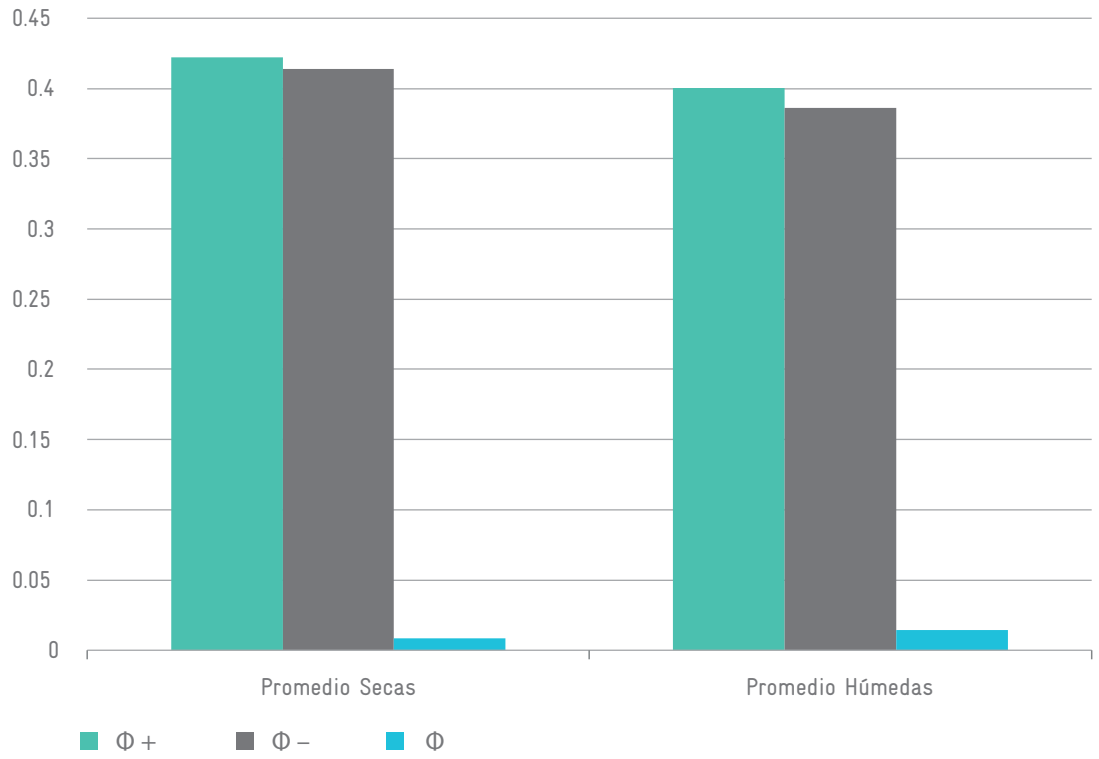
TABLA 26 Flujos Φ para cada tecnología, sin tomar en cuenta a BEKON y BTA (promedio)

Tecnologías	Φ+	Φ-	Φ
Secas	0.4221	0.4139	0.0082
Húmedas	0.4001	0.3859	0.0142

Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

Asimismo, se observa que, de manera general, no existe una diferencia significativa entre las tecnologías seca y húmeda que permita definir de manera concreta que una es superior a la otra, pues de acuerdo al resultado de la última gráfica mostrada, la tecnología de digestión anaeróbica húmeda resulta superior a la seca, pero por un margen muy corto (menos del 1 %, respecto a la calificación máxima posible de 1).

GRÁFICO 27 Flujos promedio para las tecnologías húmedas y secas (sin tomar en cuenta a BEKON y BTA)



Fuente: "Estudio de Digestión Anaerobia Húmeda y Seca a Nivel Planta Piloto para la Construcción de una Planta de Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en el Municipio de Naucalpan", Facultad de Química de la UNAM.

7.4. Conclusiones de la prueba multicriterio

Finalmente, se realizó una evaluación multicriterio de ocho diferentes tecnologías de digestión anaeróbica para el tratamiento de la FORSU que fueran relevantes en la actualidad a nivel mundial. Esta evaluación fue realizada con el método PROMETHEE, utilizando como herramienta el programa de cómputo derivado de esta metodología, llamado Visual PROMETHEE, el cual proporcionó un mayor panorama sobre las características de cada tecnología evaluada, puesto que se logró comparar, clasificar y calificar a éstas de una manera objetiva.

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que, de acuerdo a las tecnologías seleccionadas y a los datos recabados en este trabajo, no existe una tecnología que resulte significativamente superior a las demás y, si bien la tecnología BEKON resultó ser la mejor posicionada, existen criterios adicionales de más difícil comparación, que deben considerarse antes de implementar esta u otra tecnología.

Las tecnologías restantes se encuentran en un intervalo muy cercano, que inclusive llegan a ser incomparables unas a otras de acuerdo a la metodología PROMETHEE. En este sentido, las tecnologías evaluadas presentan características que, hasta cierto grado, las hacen equiparables, y una definición para seleccionar una tecnología en concreto dependerá de las características específicas de los posibles proyectos de implementación de estas tecnologías en México.

En el análisis global de tecnologías: húmeda frente a seca, eliminando la tecnología mejor posicionada (BEKON) y la de menor posicionamiento (BTA), que presentan algunas características propias de su proceso que no pudieron ser evaluadas en conjunto con las restantes, la comparación entre tecnologías húmedas y secas resulta ser cerrada, aunque ligeramente mejor para las húmedas. No obstante, los resultados obtenidos parecen indicar que, de manera general, no existe una diferencia significativa entre las tecnologías seca y húmeda que permita definir de manera concreta que una sea superior a la otra; aunque resultó evidente que los peores resultados en la evaluación correspondieron a la tecnología BTA.

De acuerdo con el análisis anterior, el desempeño de las tecnologías comerciales húmedas y secas, en plantas europeas, no resultan muy distantes unas de otras. Para el caso particular de Naucalpan de Juárez, la tecnología que se seleccione deberá considerar un adecuado sistema de separación de residuos y la disponibilidad de agua en el sitio de construcción, por mencionar algunos de los aspectos relevantes.

8.1. Conclusiones para FORSU de mercados y tianguis

- La producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda es de 74 m3 biogás por tonelada de FORSU. Las pruebas de PBM, indican que la producción de biogás máxima para este tipo de residuo es de 78 m^3 biogás por tonelada de FORSU. Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia de producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda para este tipo de sustrato es de 94 %, esto indica que el tratar residuos orgánicos de mercados y tianguis vía digestión húmeda es una opción viable.

- La composición promedio de biogás obtenido en la operación de la 3PBg es de 57 y 23 % de CH_4 y CO_2, respectivamente, con trazas de H_2S (0.1 %). Esto quiere decir, por cada m^3 de biogás producido sólo 0.57 m^3 corresponde a CH_4.

- La generación eléctrica para este tipo de sustrato se determinó que fue de 110 kWh por tonelada de FORSU.

- Para el sistema de digestión seca, la producción de biogás fue de 0.15 m^3 biogás por tonelada de FORSU alimentada. Con una composición promedio de biogás mediante digestión anaeróbica seca de 4 y 23 % de CH_4 y de CO_2, respectivamente, con trazas de H_2S (1000 ppm). Los valores de producción de biogás y contenido de CH_4 son bajos y esto se debe en gran medida a que sólo se efectuó una carga (un ciclo), y se requieren más ciclos de alimentación para lograr resultados confiables en la producción de biogás.

8.2. Conclusiones para FORSU domiciliaria

- La producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda es de 76 m^3 biogás por tonelada de FORSU. Las pruebas de PBM, indican que la producción de biogás máxima para este tipo de residuo es de 93 m3 biogás por tonelada de FORSU. Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia de producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda para este tipo de sustrato es de 81 %, esto indica que el tratar residuos orgánicos domiciliarios vía digestión húmeda es una opción viable.

- La composición promedio de biogás obtenido en la operación de la 3PBg es de 61 y 22 % de CH_4 y CO_2, respectivamente, con trazas de H_2S (1000 ppm).

- La generación eléctrica para este tipo de sustrato fue de 113 kWh por tonelada de FORSU.

- Para el sistema de digestión seca la producción de biogás fue de 1.25 m^3 biogás por tonelada de FORSU alimentada. Con una composición promedio de biogás mediante digestión anaeróbica seca de 10 y 23 % de CH_4 y CO_2, respectivamente, con trazas de H_2S (1000 ppm). Los valores de producción y composición son bajos y se debe en gran medida a que sólo se efectuó una carga (un ciclo), y se requieren más ciclos de alimentación para lograr resultados confiables en la producción de biogás.

8.3. Conclusiones para FORSU de grandes generadores

- El sustrato de grandes generadores suministrado para las pruebas de potencial de CH_4 y el experimento con un reactor de 5 litros, es una muestra atípica, esto se debe a que se suministró en una sola ocasión y el contenido de este presentaba un alto contenido de harinas y carbohidratos, los cuales son de fácil degradación y, por lo tanto, se potencializó la producción de biogás.

- La producción de biogás en la prueba de laboratorio con un reactor de 5 litros fue de 168 m3 biogás por tonelada de FORSU alimentada. Las pruebas de PBM, indican que la producción de biogás máxima para este tipo de residuo es de 163 m^3 biogás por tonelada de FORSU. Por lo tanto, el porcentaje de eficiencia de producción de biogás en la 3PBg vía digestión húmeda para este tipo de sustrato es de 103 %, esto se debe a que el sustrato empleado para estas pruebas contenía una gran cantidad de material biodegradable.

- La composición promedio de biogás obtenido es de: 58 y 23 % de CH_4 y CO_2, respectivamente, con trazas de H_2S (1000 ppm).

- La generación eléctrica para este tipo de sustrato se estima que fue de 251 kWh por tonelada de FORSU.

8.4. Conclusiones generales

- El suministro de residuos orgánicos fue un factor fundamental durante la operación de la 3PBg, ya que la variación en cantidad y calidad de material biodegradable en el sustrato suministrado impacta en la producción y composición de biogás. Por lo tanto, el implementar programas de separación de residuos orgánicos desde origen garantizaría la calidad y cantidad de material biodegradable, obteniendo mayor producción de biogás con mayor porcentaje CH_4, además de reducir los tiempos muertos (operación de equipos sin procesar residuo) durante el pretratamiento de la FORSU, lo que se traduce en disminución en el consumo de energía y, por lo tanto, en dinero erogado para el pago de energía.

- Los residuos orgánicos con un porcentaje de humedad alto, deben manejarse de tal manera que los lixiviados generados se capten y se incorporen en el proceso de digestión anaeróbica, ya que cuentan con materiales biodegradables, además de una elevada humedad, lo que hace que puedan ser aprovechados en el proceso de digestión como agua de dilución, disminuyendo la cantidad de agua cruda requerida en el pretratamiento de sustratos que se procesen mediante digestión húmeda.

- La composición del biogás generado con el proceso de digestión anaeróbica húmeda con los distintos sustratos es muy similar, con valores de CH_4 que oscilan entre 58 y 61 % y de CO_2 con valores entre 22 y 23 %. Por lo tanto, no hay razón para dar preferencia a algún sustrato en particular si el objetivo es generar biogás con una alta concentración de CH_4.

- El tratamiento de la FORSU por medio del proceso de digestión anaeróbica aunado a la producción de biogás, brinda un tratamiento adecuado, ya que se aprovechan entre 80 y 90 % de sólidos con respecto a la alimentación de sólidos suministrada, además brinda una remoción de materia orgánica del orden del 50 % para los tres sustratos utilizados.

- De las tres FORSU utilizadas para las pruebas de PBM, la correspondiente a grandes generadores fue la que presentó una producción más elevada de biogás por unidad de masa tratada, 43 % más que la de mercados y tianguis y 52 % más que la domiciliaria. Lo anterior se presentó debido a la composición de la muestra enriquecida con una mayor cantidad de materia orgánica disponible y potencialmente biodegradable, que se refleja claramente en la cantidad de ST y SV que se obtuvieron de cada una de las muestras; sin embargo la producción alcanzada por los tres sustratos analizados se asemeja bastante con las reportadas en procesos industriales y en distintas fuentes bibliográficas anteriormente mencionadas, haciéndolos candidatos adecuados para un escalamiento de proceso a nivel industrial o en este caso municipal.

- Los resultados recopilados durante la operación de la 3PBg, muestran un rendimiento favorable para cualquiera de los residuos tratados, cabe mencionar que la muestra de FORSU domiciliaria, al ser un residuo con una caracterización rica y diversa, aporta mayor cantidad de elementos, como productos cárnicos, que nutren los procesos y que en codigestión con las muestras de mercados y tianguis tienen el potencial de incrementar la producción de biogás generada a partir de la mezcla de ambas.

REFERENCIAS

[1] Alibardi L., Cossu R. (2015) *Composition variability of the organic fraction of municipal solid waste and effects on hydrogen and methane production potentials*. Waste Management. 36, pp. 147-155.

[2] American Public Health Association (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association 21th ed., American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. Washington D.C., EEUU.

[3] Angelidaki I., Alves M., Bolzonella D., Borzacconi L., Campos J.L., Guwy A.J., Kalyuzhnyi S., Jenicek P., Van Lier J.B. (2009). *Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays*. Water Science and Technology, p. 927.

[4] Angenent L. T., Sung S., Raskin L. (2002). *Methanogenic population dynamics during start up of a full-scale anaerobic sequencing batch digestor treating swine waste*. Water Research 36, pp. 4648-4654.

[5] Banks C. J., Chesshire M., Heaven S., Arnold R. (2011). *Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance*. Bioresource Technology, 102, pp. 612-620.

[6] Bolzonella D., Fatone F., Pavan P., Cecchi F. (2005) *Anaerobic fermentation of organic municipal solid waste of soluble organic compounds.* Industrial and Engineering Chemistry Research, 44 (10), pp. 3412-3418.

[7] Brans, J. P. y Mareschal, B., 2004. *PROMETHEE Methods*, Bruselas: ULB.

[8] Buffiere P., Loise, D., Bernet N., Delgenes J.P. (2006). *Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties*. Water science and technology, 53 (8), pp. 233-241.

[9] California Integrated Waste Management Board (2008). *Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste*. California Environmental Protection Agency, Contractor's Report to the Board. Consultado el 25 de noviembre de 2017 en: http://www.calrecycle.ca.gov/publications/Documents/1275/2008011.pdf.

[10] Davidsson A., Gruvberger C., Christensen T. H., Hansen T. L., Jansen J. C. (2007). *Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste*. Waste Management, 27 (3), pp. 406-414.

[11] De Baere L., Matteheeuws B., Velghe F. (2010). *State of the art of anaerobic digestion in Europe*. IWA Congress on Anaerobic Digestion, Guadalajara, México.

[12] Deublein D., Steinhauser A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KgaA, Weinheim, p. 443.

[13] DiLallo R., Albertson O. E. (1961) *Volatile Acids by Direct Titration*. Water Pollution Control Federation, 33 (4), pp. 356-365.

[14] Durán Moreno A., Casas Gutiérrez D.N., Alcántara Hernández R.J., Rojas Zamora U., Vázquez Cuevas G.M., Roa Luna M. (2014). *Fundamentos de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos*. Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM. ISBN: 978-607-02-5106-1.

[15] Durán Moreno A., Casas Gutiérrez D.N., Islas Bernal I.F., De Regil González J.C., Vázquez Cuevas G.M., Roa Luna, M. (2014). *Bases de diseño del proceso de digestión anaerobia.* Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM. ISBN: 978-607-02-5104-7.

[16] Durán Moreno A., Garcés Rodríguez M., Velasco A. R., Marín Enríquez J.C., Gutiérrez Lara R., Moreno Gutiérrez A., Delgadillo Hernández N. A. (2013). *Mexico City's municipal solid waste Characteristics and composition analysis*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 29 (1), pp. 39-46.

[17] Fernández R. J. (2010). *Tesis de doctorado: Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en digestores en fases de temperatura*.

[18] Forster-Carneiro, T., Perez, M. y Romero García, L. (2008). *Anaerobic digestion of municipal solid wastes: Dry thermophilic performance*. Bioresource technology.

[19] Gironés, X., Madrid, D., y Valls, A., 2008. *Comparación de dos métodos de Toma de Decisiones Multicriterio: MACBETH y PROMETHEE*, Departament d'Enginyeria Informatica i Matemàtiques Universitat Rovira i Virgili, España, p. 52.

[20] Holliger C., Alves M., Andrade D., Angelidaki I., Astals S., Baier U., Bougrier C., Buffier P., Carballa M., Wilde V., Ebertseder F., Fernandez B., Ficara E. y otros (2016). *Towards a standardization of biomethane potential tests*. Water Sciene & Technology 16, pp. 1-9.

[21] Nayono, Satoto, Winter, Josef y Gallert, Claudia. (2009). *Anaerobic digestion of pressed off leachate from the organic fraction of municipal solid waste*. Waste management (New York, N.Y.).

[22] Norma Mexicana NMX-AA-015-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.

[23] Norma Mexicana NMX-AA-019-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico "in situ".

[24] Norma Mexicana NMX-AA-022-1985 Proteccion al Ambiente-Contaminacion del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos.

[25] Pérez A., Torres P. (2008). *Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables*. Ingeniería y Competitividad, Vol. 10, pp. 41-52, Colombia.

[26] Speece, R. E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters. Archae Press, Nashville.

[27] Thomé-Kozmiensky K. J., Thiel S. (2012). *Waste Management*. Volume 3: Recycling and Recovery. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. Nuevo Ruppin, Alemania, pp. 517-526.

[28] Tsilemou, K. y Panagiotakopoulos D. (2006). *Approximate cost functions for solid waste treatment facilities*. Waste Management Res. 24, pp. 310-322.

[29] Valorgas. (2010). Valorisation of Food Waste to Biogas. Consultado el 25 de noviembre de 2017 en: http://www.valorgas.soton.ac.uk/deliverables.htm

[30] Van der Last, A.R.M. and Lettinga, G. (1992). *Anaerobic treatment of domestic sewage under moderate climatic (Dutch) conditions using upflow reactors at increased superficial velocities*. Wat. Sci. Tech., 25 (7), pp. 167-178.

MÉTODO DE CUARTEO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El objetivo de este método es cuantificar las proporciones de los subproductos que integran el residuo orgánico; estos subproductos pueden ser vegetales, fruta, comida, carne, papel, cartón, metal, plástico, etcétera. Este método también permite estimar el peso volumétrico de los residuos.

Se basa en la Norma Mexicana NMX-AA-015-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo; se adaptó al cuarteo de los subproductos contenidos en el residuo orgánico (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos).

Aparatos y equipo.

- Báscula de piso, con capacidad de 200 kg
- Dos o tres tambos metálicos de 200 litros
- Palas curvas
- Overoles
- Guantes de carnaza
- Escobas
- Botas de hule
- Cascos de seguridad
- Mascarillas protectoras

Procedimiento

1. Se requiere la participación de cuando menos tres personas. El equipo requerido antes descrito está de acuerdo con el número de personas que participan en el cuarteo.
2. El residuo sólido orgánico se vacía formando un montón sobre un área plana horizontal de 4 m x 4 m de cemento pulido o similar y bajo techo.
3. El montón de residuos sólidos se traspalea con pala hasta homogeneizarlos, a continuación, se divide en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D.
4. Se eliminan las partes opuestas A y C o B y D, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kg de residuos sólidos con los cuales se debe hacer la selección de subproductos como vegetales, fruta, comida, carne, papel, cartón, metal, plástico, etcétera.
5. De las partes eliminadas del primer cuarteo se determina el peso volumétrico de los residuos sólidos *in situ*, según Norma Mexicana NMX-AA-019-1985. De manera resumida, se llena completamente un tambo de 200 litros con residuo orgánico, se registra la masa contenida en el recipiente metálico con la báscula y se efectúa el cálculo del peso volumétrico, que es el cociente entre la masa del residuo y el volumen del tambo.

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS Y HUMEDAD DEL RESIDUO ORGÁNICO

Esta prueba es una adecuación del código 2540 G del manual S*tandard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [2] que publica el organismo American Public Health Association. Consiste en calcular la humedad y el contenido de SV y SF en muestras representativas del residuo orgánico a tratar en la planta. La humedad es un parámetro clave en planta, el residuo tiene que cumplir con una humedad mínima del 90 % para su tratamiento en el digestor anaeróbico húmedo, el contenido de SV permite estimar la producción límite de biogás por kilogramo de residuo orgánico.

Materiales y equipo

- Balanza analítica
- Cápsulas de porcelana
- Pinzas de crisol
- Guantes especiales para mufla
- Horno de esterilización
- Horno mufla
- Desecador con gel de sílice

Procedimiento

1. La manipulación de las cápsulas de porcelana se debe efectuar siempre con las pinzas de crisol, no con las manos. Las manos dejan rastros de grasa que afectan la medición de la masa de las muestras.
2. Dejar la cápsula de porcelana en horno de esterilización a 105 °C por 12 horas (peso constante).
3. Pasadas las 12 horas, retirar la cápsula con los guantes especiales y dejar en desecador hasta que se enfríe.
4. Registrar peso de cápsula de porcelana, mcap (manipular siempre las cápsulas de porcelana con las pinzas de crisol).
5. Poner en la cápsula de porcelana aproximadamente 5 g de residuo orgánico, esta cantidad se registra, mmuestra.
6. Dejar la cápsula con residuo en el horno de esterilización a 105 °C por 12 horas.
7. Pasadas las 12 horas, retirar la cápsula del horno de esterilización con los guantes especiales; instale la cápsula en el desecador para que se enfríe.
8. Registre la masa de la cápsula, la balanza analítica le dará la lectura de la suma de las masas de la cápsula y el residuo orgánico seco, mcap+muestra-seca.
9. Con los guantes especiales, deje la cápsula en el horno mufla a 550 °C por 20 minutos.
10. Retire la cápsula del horno mufla con los guantes especiales y déjela en el desecador para que se enfríe.
11. Registre la masa de la cápsula, la balanza analítica le dará la lectura de la suma de las masas de la cápsula y la ceniza (residuo calcinado), mcap+muestra-calcinada.
12. Con las masas registradas se pueden calcular los porcentajes de humedad (%H), sólidos volátiles (%SV) y sólidos fijos (%SF).

$$\%H = \frac{m_{cap} + m_{muestra} - m_{cap+muestra\ seca}}{m_{muestra}} 100$$

$$\%SV = \frac{m_{cap+muestra\ seca} - m_{cap+muestra\ calcinada}}{m_{muestra}} 100$$

$$\%SF = \frac{m_{cap+muestra\ calcinada} - m_{cap}}{m_{muestra}} 100$$

La determinación de humedad y sólidos se realiza por triplicado.

DILUCIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)

El residuo que se trata en el digestor húmedo debe cumplir con una humedad de por lo menos 90 % (m/m), el residuo que llega a la Planta no cumple con esta especificación, es necesaria la adición de agua para alcanzar la humedad requerida. En esta sección se describe el cálculo de la adición de agua.

La definición de porcentaje de humedad la podemos aplicar a la FORSU de la siguiente manera:

$$\%H = \frac{masa\ de\ H_2O\ en\ la\ FORSU}{masa\ total\ de\ la\ FORSU} 100 \qquad \ldots(1)$$

A partir de esta definición general se proponen las siguientes cantidades:

$\%H_{act}$ es el porcentaje de humedad actual de la FORSU triturada antes de la adición de agua.

$\%H_{ob}$ es el porcentaje de humedad objetivo de la FORSU triturada, que se logra con la adición de agua; es el porcentaje de humedad que debe tener la FORSU ($\%H_{ob}$ = 90 %) para poder ser alimentada al digestor húmedo.

m_{H2O} = (kg de agua a adicionar)/(kg FORSU), para cumplir con la humedad requerida ($\%H_{ob}$ = 90 %)

De la ecuación (1) podemos calcular el porcentaje de humedad objetivo de la FORSU:

$$\%H_{ob} = \frac{\frac{\%H_{act}}{100} + m_{H_2O}}{1 + m_{H_2O}} 100$$

De la expresión anterior podemos despejar m_{H_2O},

$$m_{H_2O} = \frac{H_{ob} - H_{act}}{100 - H_{ob}}$$

La adición de agua se calcula multiplicando m_{H2O} por la cantidad total de FORSU a alimentar al digestor húmedo.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Definición

La demanda química de oxígeno representa la cantidad del oxígeno contenido en dicromato de potasio necesaria para oxidar la materia orgánica contenida en la muestra.

Principio

Esta determinación se basa en la oxidación de los compuestos contenidos en una muestra utilizando un oxidante fuerte, como es el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), en un medio fuertemente ácido y utilizando sulfato de plata (Ag_2SO_4) como catalizador. La reacción se lleva a cabo a 148 °C durante 2 horas. La adición de sulfato mercúrico ($HgSO_4$) permite la inactivación de los iones cloruro (Cl^-) para 4 que no consuman oxígeno del dicromato de potasio. El dicromato de potasio que no reacciona (restante) se determina por espectrofotometría.

Intervalo

20 a 900 mg/L

Error estándar

± 5 %

Interferencias

Los iones cloruro consumen oxígeno durante la reacción y por esta razón un contenido elevado de estos puede ocasionar valores altos de DQO.

Reactivos

a) **Solución de dicromato de potasio**. En un matraz aforado de un litro agregar 500 mL de H2Od y disolver, bajo agitación continua, 10.216 g de K2Cr2O7 (previamente secado en estufa a 103°C por 2 horas), agregar 167 mL de H_2SO_4 concentrado y 33.3 g de HgSO4; dejar enfriar y aforar a un litro con H2Od.
b) **Reactivo de H_2SO_4**. En un matraz aforado de un litro agregar 10.09 g de Ag_2SO_4 aforar a un litro con H_2SO_4 concentrado. Dejar reposar sin agitación durante el tiempo necesario hasta que el Ag_2SO_4 se disuelva (generalmente de 1 a 2 días) en ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)

Procedimiento

1. En un vial con tapa rosca de 10 mL se colocan 2.5 mL de la muestra y se añaden 1.5 ml de la solución de $K_2Cr_2O_7$ y 3.5 mL del reactivo de H_2SO_4. Tapar y agitar balanceando el vial.
2. Introducir los viales en el reactor HACH por 2 horas a 148° C.
3. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
4. Vaciar el contenido del vial en una celda de vidrio y leer la absorbancia de las muestras a 600 nm.
5. Se debe leer primero el testigo para ajustar la absorbancia a cero.

NOTA: Realizar las muestras por duplicado y hacer un testigo con H_2O_d.

Curva de calibración

1. Preparar una solución patrón de biftalato ácido de potasio ($KHC_8H_4O_4$) que represente una concentración de 1000 mg DQO/L. En un matraz aforado de un litro disolver 0.850g de $KHC_8H_4O_4$ y aforar con H_2O_d.
2. De la solución patrón se toman los volúmenes indicados en la tabla para aforarlos a 100 ml con agua destilada. Los valores correspondientes de DQO también se indican en la tabla.

Vol. de la solución patrón (mL.)	(DQO mg/L)
5	50
15	150
25	250
35	350
45	450
55	550
65	650
75	750
85	850

3. Preparar un testigo con agua destilada para fijar la absorbancia a cero en 600 nm.
4. Medir la absorbancia de cada una de las diluciones.
5. Elaborar una gráfica en donde aparezca la absorbancia (y) vs. la concentración(x).
6. Hacer regresión lineal para conocer el coeficiente de correlación (R^2) y la ecuación de la recta. El coeficiente de correlación (R^2) deberá ser superior a 0.98.

Cálculo

$$DQR\ {}^{mg}/_{L} = \frac{Absorbancia - b}{m}$$

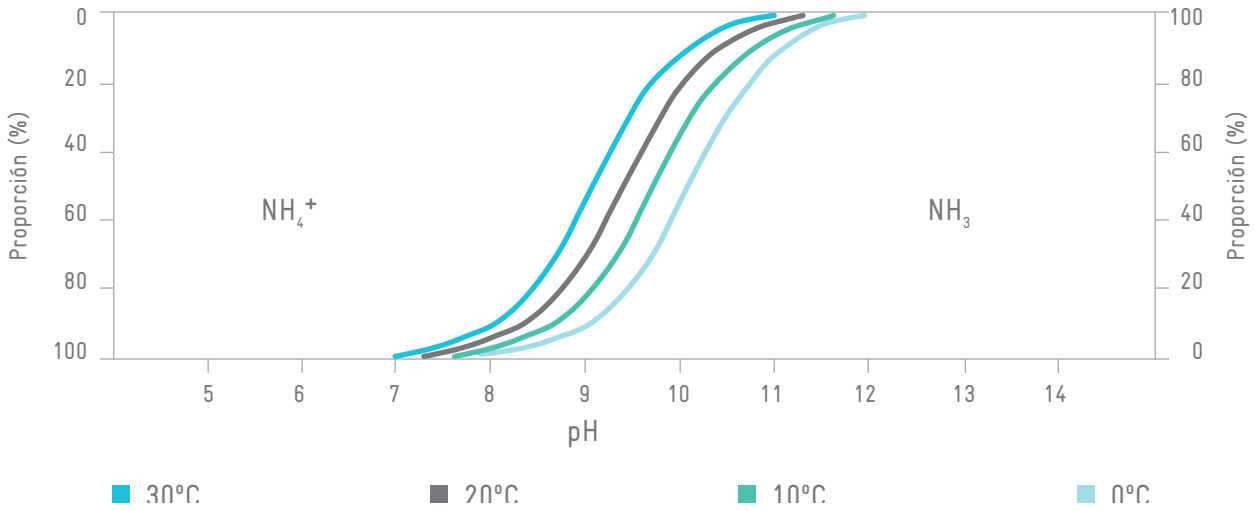
Reporte de resultados

Debido a que esta determinación tiene un error estándar de 5 % como máximo, se acostumbra reportar los valores únicamente como enteros. Los resultados se reportan en unidades de mg/L (miligramos de oxígeno consumido por litro de muestra).

NITRÓGENO AMONIACAL ($N-NH_4^+$)

Definición

El nitrógeno amoniacal se encuentra en forma de NH_4^+ y NH_3, existiendo en dependencia del pH, por lo tanto, para su determinación la muestra debe ajustarse con solución tampón a pH=9.5 y de esta manera poder cuantificar ambas especies.



Principio

Determinación por destilación. El método se basa en la transformación del nitrógeno, contenido en una muestra, en amoníaco, en medio alcalino. La destilación de la muestra a tratar permite la separación del amoniaco (el cual se encontrará en el destilado) de los compuestos de nitrógeno orgánico. El destilado se titula con una solución de ácido sulfúrico para cuantificar el nitrógeno amoniacal.

Intervalo

Contenido mayor a 5 mg $N-NH_4^+$/L (del 10 al 20 % del contenido de $N-NH_4$ en muestra).

Error estándar

± 5 %

Interferencias

La glicina, urea, ácido glutámico, cianatos y acetamida, se hidrolizan muy lentamente, pero sólo la urea y los cianatos se hidrolizan por destilación a pH=9.5, en cantidades alrededor de 7 y 5 %, respectivamente.

Compuestos alcalinos volátiles, como hidracina y aminas influyen en los resultados volumétricos.

El cloro residual reacciona con el amoniaco por lo que debe removerse por pretratamiento de la muestra.

Reactivos

a) Solución buffer de boratos 0.025 N.
Adicionar 88 mL de solución 0.1 N de NaOH a 500 mL de solución 0.025 N de borato de sodio, $Na_2B_4O_7*10H_2O_d$, y aforar a 1 litro.
Solución de borato de sodio $Na_2B_4O_7.10H_2O$. Disolver 9.5 g de $Na_2B_4O_7.10H_2O$ (tetraborato de sodio) en un litro de H_2O_d.
Solución de hidróxido de sodio 0.1 N. Disolver 4 g de NaOH (hidróxido de sodio) en un litro de H_2O_d.

b) Solución de NaOH 6N. En un matraz aforado de 500 ml disolver 120 g de NaOH en 200 ml de H_2O_d. Aforar a 500 ml con H_2O_d.

c) Solución indicadora mixta. En un matraz aforado de un litro disolver 20g de H_3BO_3 (ácido bórico) en H_2O_d libre de amonio y adicionarle 10mL de solución indicadora mixta MERCK y aforar a un litro.

d) Solución estándar de ácido sulfúrico 0.02 N. Diluir 0.56mL de H_2SO_4 concentrado en un litro de H_2O_d y estandarizar con una solución de Na_2CO_3 0.05N y titular a pH 5.

e) Solución de carbonato de sodio 0.05 N. En un matraz aforado de un litro disolver 2.5g de Na_2CO_3 y aforar a un litro con H_2O_d, esta solución es estable solo una semana.

Procedimiento

1. Adicionar 25 mL de solución buffer de boratos a una muestra de 50 mL (agua residual) o de 3-5 mL (muestra FORSU, lixiviado, dilución, etcétera).
2. Ajustar el pH con la solución de NaOH 6N hasta pH=9.5 (si es necesario).
3. Destilar la muestra durante 5 minutos utilizando el equipo destilador BÜCHI.
4. Recoger el destilado en 25 mL de solución indicadora de H_3BO_3 (esta solución color violeta vira a color verde brillante en presencia de nitrógeno).
5. Titular la solución recogida con la solución de H_2SO_4 0.02 N (hasta que vire a color violeta pálido y registrar el volumen gastado).

NOTA: Realizar las muestras por duplicado y hacer un testigo con H_2O_d.

Cálculo

$$N - NH4+ \, {}^{mg}/_{L} = \frac{(A-B) * N * 14}{volúmenes\ de\ la\ muestra\ (L)}$$

N = Normalidad de la solución de H_2SO_4.
A = Vol. de solución de H_2SO_4 gastado en titular la muestra (L).
B = Vol. de solución de H_2SO_4 gastado en titular el blanco (L).

Reporte de resultados

Nitrógeno de amonio ($N\text{-}NH_4^+$).

Ejemplos: 0.59 mg $N\text{-}NH_4^+$/L.

5.7 mg $N\text{-}NH_4^+$/L.

FÓSFORO TOTAL (PT)

Definición

Es la suma de los compuestos de las tres formas de fósforo en las que se puede encontrar presente en aguas residuales: ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos.

Principio

Primero la conversión de la forma fosforada en ortofosfato disuelto, por oxidación de la materia orgánica, y después determinación colorimétrica del ortofosfato disuelto.

Intervalo

Límite de detección de 1.0-30.0 mg $P\text{-}PO_4^{-3}$

Error estándar

± 0.53 %

Interferencias

Evitar contacto de la muestra con materiales de plástico, sílice y exceso de molibdato.

Reactivos

a) Solución indicadora de fenolftaleína. Disolver 80 mg de fenolftaleína en 100 ml de metanol absoluto.
b) Solución de hidróxido de sodio 1 N. Adicionar 20 g de NaOH a 500 ml H_2O_d.
c) Ácido sulfúrico concentrado.
d) Ácido nítrico concentrado.

Procedimiento

1. Tomar una muestra de 1 mL (Mezcla FORSU) o una fracción diluida y depositarla en un vaso de precipitado de 100 mL.
2. Agregar 1 mL de H_2SO_4 concentrado y 5 mL de HNO_3 concentrado.
3. Digerir hasta un volumen de 1mL y continúese hasta que la solución se vuelva incolora, para eliminar el HNO_3. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
4. Añadir 20 mL de H_2O_d y una gota de solución indicadora de fenolftaleína.
5. Añadir la cantidad necesaria de una solución de NaOH 1 N para producir un ligero tinte rosa.

6. Transferir la solución a un matraz de 100 mL y aforar con H_2O_d (si la muestra está turbia es necesario filtrar utilizando un filtro de membrana de 0.45µm).
7. Determinar el fósforo colorimétricamente con el método de determinación de fósforo como ortofosfatos.

Curva de calibración

Se utilizará la misma que para el método de determinación de fósforo como ortofosfatos.

Cálculo

$$Ptotal\ (^{mg}/_{L})\ \frac{mgP-PO^{-3}}{L} * \frac{PM\ (P)}{PM\ (PO_4^{-3})}$$

PM(P): Peso molecular promedio del fósforo
PM(PO_4^{-3}): Peso molecular promedio del ion ortofosfato

Reporte de resultados

Fósforo Total (PT)

Ejemplos: 0.95 mg PT /L.

6.6 mg PT /L.

GENERACIÓN DE BIOGÁS

En promedio, el motogenerador consume 4.56 m^3 de biogás por hora de operación. La potencia del equipo es de 8 kW y su eficiencia es del 85 %. Con base en esta información, la generación de electricidad se calcula de la siguiente manera:

$$Generación\ de\ electricidad\,(kWh) = 0.85\left(\frac{8\,kW}{4.56\frac{m^3}{h}}\right)Q = \frac{85}{57}\frac{kWh}{m^3}Q$$

Q es el volumen de biogás consumido por el motogenerador en m^3.

DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ALCALINIDAD ALFA (α)

Este parámetro da información de la estabilidad del digestor húmedo, permite saber si este equipo sigue en condiciones para continuar su alimentación sin riesgo de acidificación. Es una titulación en dos lecturas de pH (4.3 y 5.75) con una solución de ácido fuerte diluido (generalmente con una concentración 0.1 N), en la planta se usa una solución de ácido sulfúrico 0.08 N.

Materiales y equipo

En la 3PBg de digestión anaeróbica se emplea el siguiente material:

- Tres vasos de precipitado de 50 mL
- Solución de ácido sulfúrico 0.08 N
- Bureta graduada de 50 mL
- Potenciómetro

Procedimiento

1. Se toma un volumen aproximado de 5 mL de inóculo del digestor en un vaso de precipitado de 50 mL.
2. Con el potenciómetro se registra el pH del inóculo contenido en el vaso de precipitado, el pH debe ser mayor a 7.
3. Se llena la bureta con la solución de ácido sulfúrico 0.08 N.
4. Se efectúa la titulación hasta llegar a pH=5.75, se registra el volumen de solución de ácido para llegar a ese valor de pH ($V_{pH=5.75}$).
5. Se continúa la titulación hasta llegar a pH=4.3. Se registra el volumen de solución de ácido para llegar al valor de 4.3 ($V_{pH=4.3}$).
6. Se calcula el índice de alcalinidad α con los volúmenes registrados:

$$\alpha = \frac{V_{pH=5.75}}{V_{pH=4.3}}$$

7. La determinación del índice α se hace por triplicado

   Un valor de α cercano a la unidad indica que el digestor está en condiciones de estabilidad y se puede seguir alimentándolo. Si se observa un valor de α inferior a 0.7, el digestor está en riesgo de acidificación y hay que suspender la alimentación

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE RECEPCIÓN DE RESIDUOS Y CARACTERIZACIÓN DE LA FORSU DEL MUNICIPIO DE NAUCALPAN DE JUÁREZ

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
10 / JULIO / 2017			
12 / JULIO / 2017			
14 / JULIO / 2017			
17 / JULIO / 2017			
19 / JULIO / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
21 / JULIO / 2017			
24 / JULIO / 2017			
26 / JULIO / 2017			
28 / JULIO / 2017			
31 / JULIO / 2017			
02 / AGOSTO / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
07 / AGOSTO / 2017			
09 / AGOSTO / 2017			
14 / AGOSTO / 2017			
18 / AGOSTO / 2017			
21 / AGOSTO / 2017			
23 / AGOSTO / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
25 / AGOSTO / 2017			
28 / AGOSTO / 2017			
30 / AGOSTO / 2017			
04 / SEPTIEMBRE / 2017			
06 / SEPTIEMBRE / 2017			
08 / SEPTIEMBRE / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
11 / SEPTIEMBRE / 2017			
13 / SEPTIEMBRE / 2017			
18 / SEPTIEMBRE / 2017			
25 / SEPTIEMBRE / 2017			
27 / SEPTIEMBRE / 2017			
29 / SEPTIEMBRE / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
02 / OCTUBRE / 2017			
04 / OCTUBRE / 2017			
10 / OCTUBRE / 2017			
11 / OCTUBRE / 2017			
12 / OCTUBRE / 2017			
16 / OCTUBRE / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
20 / OCTUBRE / 2017			
24 / OCTUBRE / 2017			
25 / OCTUBRE / 2017			
27 / OCTUBRE / 2017			
01 / NOVIEMBRE / 2017			
06 / NOVIEMBRE / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
08 / NOVIEMBRE / 2017			
09 / NOVIEMBRE / 2017			
10 / NOVIEMBRE / 2017			
13 / NOVIEMBRE / 2017			
15 / NOVIEMBRE / 2017			
17 / NOVIEMBRE / 2017			

	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	CUARTEO DE RESIDUOS	SUBPRODUCTOS
22 / NOVIEMBRE / 2017			
24 / NOVIEMBRE / 2017			

© Publicado por: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

– Cooperación Alemana al Desarrollo –

Friedrich-Ebert-Allee 36 + 40
53113 Bonn, Deutschland
T +49 228 44 60-0
F +49 228 44 60-17 66

Dag-Hammarskjöld-Weg 1 – 5
65760 Eschborn, Deutschland
T +49 61 96 79-0
F +49 61 96 79-11 15
E info@giz.de
I www.giz.de

Agencia de la GIZ en México: Torre Hemicor, PH
Av. Insurgentes Sur No. 826
Col. Del Valle, CP 03100
Ciudad de México, México
T +52 55 5536 2344
F +52 55 5536 2344
E giz-mexiko@giz.de
I www.giz.de/mexico