



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

**INFLUENCIA DE COMPUESTOS LIGNOCELULÓSICOS CONTENIDOS EN  
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS MUNICIPALES SOBRE LA PRODUCCIÓN  
BIOGÁS**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

**PRESENTA:**  
LORENA FIGUEROA ESCAMILLA

**TUTOR PRINCIPAL**  
DR. SIMÓN GONZÁLEZ MARTÍNEZ-INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**COMITÉ TUTOR**  
DRA. IDANIA VALDEZ VÁZQUEZ- INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM  
M. EN C. JOSÉ MANUEL MÉNDEZ STIVALET - FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



---

---

## **JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Petia Mijaylova Nacheva  
Secretario: Dra. Idania Valdez Vázquez  
1er. Vocal: M. en C. José M. Méndez Stivalet  
2do. Vocal: Dr. Daniel De Los Cobos Vasconcelos  
3er. Vocal: Dr. Simón González Martínez

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Ingeniería Ambiental, edificio 5, Instituto de Ingeniería, UNAM.

## **TUTOR DE TESIS:**

Dr. Simón González Martínez

-----  
**FIRMA**

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del  
09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020



---

---

## AGRADECIMIENTOS

*A mi mamá, por SIEMPRE estar para mí, por oírme todos los días durante estos dos años y acompañarme en los llantos, enojos y sobre todo alegrías de estar cumpliendo este sueño.*

*A mi papá, porque siempre ha creído en mí, más que yo misma. Por los consejos y por darme las bases para poder llegar a donde estoy ahora.*

*A Tavo, Gaby y Vane, por sus visitas a México, haciendo que me olvidara un poco del estrés de la maestría al estar rodeada de lo que más quiero.*

*A Edgar, Gis, Gael y Lucía, por acompañarme en estos dos años, sintiendo el cariño de mi familia aquí en México.*

*A mi abues: Maruca y Caro, por siempre estar al pendiente de mí.*

*A Josa, por estar conmigo en estos 7 años, demostrarme su amor y atención a pesar de la distancia. Por apoyarme en todo y porque ambos continuamos de la mano cumpliendo nuestros objetivos... ¡Ahora vamos por una vida juntos, te amo!*

*¡Mis Logros sin ustedes no sabrían igual!*



---

---

## RECONOCIMIENTOS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Instituto de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Ambiental, por permitirme realizar mi maestría y trabajo experimental en sus instalaciones.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada que me permitió realizar mis estudios de maestría.*

*Al Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía, Clúster en Biocombustibles Gaseoso, por el apoyo obtenido mediante el Proyecto SENER-CONACYT N°. 247006.*

*Al Dr. Simón González Martínez, por compartirme sus conocimientos, por el apoyo brindado en todo momento, por orientarme, por la exigencia, por estar siempre pendiente de que se cumplieran los objetivos, por confirmarme en cada plática que uno nunca termina de aprender cosas nuevas. ¡Gracias por ser mi tutor!*

*Al Dr. Oscar González y maestros: Mario, Henry y Dimitriv, por el apoyo en el laboratorio y comentarios a mi trabajo de investigación.*

*A la Dra. Idania Valdez, M. en C. José Manuel Méndez, Dra. Petia Mijaylova y Dr. Daniel de los Cobos por sus observaciones, aportes y comentarios recibidos que me permitieron mejorar mi tesis.*

*A Ricardo y Jesús por hacer las horas en el laboratorio, clases, trabajos, estudios, seminarios menos pesados con su compañía.*

*A Moni por su apoyo y amistad desde los primeros días en el posgrado.*



## CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....                                     | <b>1</b>  |
| 1.1. Objetivo general .....                                      | 2         |
| 1.2. Objetivos específicos.....                                  | 2         |
| 1.3. Alcances.....   | 3         |
| <b>2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS</b> .....                         | <b>4</b>  |
| 2.1. Generación.....   | 4         |
| 2.2. Composición.....  | 5         |
| 2.3. Gestión.....  | 6         |
| <b>3. CARACTERÍSTICAS DE LA FORSU</b> .....                      | <b>7</b>  |
| 3.1. Características físicas.....                                | 7         |
| 3.2. Características químicas .....                              | 8         |
| 3.3. Características bromatológicas.....                         | 10        |
| <b>4. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS ORGÁNICOS</b> .....        | <b>15</b> |
| 4.1. Etapas .....  | 15        |
| 4.2. Biodegradabilidad de la materia orgánica .....              | 17        |
| 4.3. Composición de la FORSU .....                               | 19        |
| <b>5. BIOMASA LIGNOCELULÓSICA</b> .....                          | <b>23</b> |
| 5.1. Componentes de la biomasa lignocelulósica.....              | 23        |
| 5.2. Hidrólisis de compuestos lignocelulósicos.....              | 26        |
| 5.3. Recalcitrancia de lignocelulosas.....                       | 27        |
| <b>6. METODOLOGÍA</b> .....                                      | <b>29</b> |
| <b>6.1. Obtención, separación y preparación de muestra</b> ..... | <b>30</b> |
| 6.1.1. Selección del lugar de muestreo .....                     | 30        |
| 6.1.2. Obtención de la muestra de FORSU .....                    | 30        |
| 6.1.3. Separación de la FORSU .....                              | 30        |
| 6.1.4. Preparación de FORSU y fracciones.....                    | 31        |
| <b>6.2. Caracterización de muestras</b> .....                    | <b>32</b> |
| <b>6.3. Producción de metano</b> .....                           | <b>34</b> |
| <b>6.4. Selección de sustratos de referencia</b> .....           | <b>36</b> |
| <b>7. RESULTADOS</b> .....                                       | <b>37</b> |
| <b>7.1. Obtención, separación y preparación de muestra</b> ..... | <b>37</b> |
| 7.1.1 Obtención de la muestra .....                              | 37        |
| 7.1.2 Cuarteo en laboratorio.....                                | 37        |
| 7.1.3 Separación de fracciones .....                             | 38        |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>7.2. Caracterización</b> .....   | <b>40</b> |
| 7.2.1 Sólidos totales, volátiles, fijos y humedad .....   | 41        |
| 7.2.2. Demanda química de oxígeno, nitrógeno y fósforo total .....  | 44        |
| 7.2.3. Caracterización bromatológica .....  | 46        |
| 7.2.3.1 Fibras.....   | 46        |
| 7.2.3.2 Carbohidratos, proteínas y grasas .....   | 47        |
| <b>7.3. Potencial bioquímico de metano (PBM)</b> .....  | <b>50</b> |
| 7.3.1. Influencia de los compuestos lignocelulósicos sobre la biodegradabilidad .....                           | 52        |
| <b>7.4. Sustratos de referencia</b> .....   | <b>55</b> |
| 7.4.1 Sólidos totales, volátiles, fijos y humedad .....   | 55        |
| 7.4.2. Demanda química de oxígeno, nitrógeno y fósforo total .....  | 58        |
| 7.4.3. Caracterización bromatológica .....  | 59        |
| 7.4.3.1 Fibras.....   | 59        |
| 7.4.3.2 Carbohidratos, proteínas y grasas .....   | 61        |
| 7.4.4. Potencial bioquímico de metano (PBM).....  | 63        |
| 7.4.5. Comportamiento de la producción de metano con respecto al contenido de compuestos lignocelulósicos ..... | 68        |
| <b>7.5. Análisis estadístico</b> .....  | <b>70</b> |
| 7.5.1. Análisis estadístico de fracciones.....  | 70        |
| 7.5.1.1 Análisis descriptivo .....  | 70        |
| 7.5.1.2. Correlación .....  | 71        |
| 7.5.1.3. Modelos .....  | 72        |
| 7.5.1.4. Prueba de hipótesis .....  | 74        |
| <b>8. CONCLUSIONES</b> .....  | <b>77</b> |
| <b>REFERENCIAS</b> .....  | <b>80</b> |
| <b>ANEXOS</b> .....   | <b>86</b> |
| <b>Anexo A</b> .....  | <b>86</b> |
| <b>Anexo B</b> .....  | <b>87</b> |
| <b>Anexo C</b> .....  | <b>90</b> |
| <b>Anexo D</b> .....  | <b>93</b> |





## ÍNDICE DE FIGURAS

|                    | Pág   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Figura 2.1</b>  | Composición de los residuos sólidos urbanos en el mundo   | 5  |
| <b>Figura 2.2</b>  | Composición los RSU en 2012   | 6  |
| <b>Figura 3.1</b>  | Clasificación de la fibra con base a sus propiedades químicas   | 14 |
| <b>Figura 5.1</b>  | Estructura de la celulosa   | 24 |
| <b>Figura 5.2</b>  | Estructura química de la hemicelulosa   | 25 |
| <b>Figura 5.3</b>  | Estructura de lignina   | 26 |
| <b>Figura 6.1</b>  | Esquema general de la metodología   | 30 |
| <b>Figura 6.2</b>  | Separación de FORSU por fracciones, a) separación en 12 fracciones clasificadas en 4 grupos de RSU de la ciudad de Kioto y separación en 8 fracciones de la FORSU de la Ciudad de México. | 31 |
| <b>Figura 6.3</b>  | Equipo utilizado para homogeneizar la muestra   | 32 |
| <b>Figura 6.4</b>  | Esquema de caracterización de FORSU y componentes   | 32 |
| <b>Figura 6.5</b>  | Fascos de digestión anaerobia   | 34 |
| <b>Figura 6.6</b>  | Sistema automático de potencial de metano   | 35 |
| <b>Figura 6.7</b>  | Molino para sustratos con humedad menor al 60%  | 36 |
| <b>Figura 7.1</b>  | Etapas del proceso de muestreo  | 38 |
| <b>Figura 7.2</b>  | Cuarteo en laboratorio  | 39 |
| <b>Figura 7.3</b>  | Fracciones identificadas al inicio de la separación de la FORSU   | 40 |
| <b>Figura 7.4</b>  | Fracciones identificadas en la FORSU de la Ciudad de México   | 41 |
| <b>Figura 7.5</b>  | Composición de fracciones en base húmeda  | 43 |
| <b>Figura 7.6</b>  | Composición bromatológica de fracciones y FORSU   | 49 |
| <b>Figura 7.7</b>  | Curvas de producción de biogás y metano de fracciones y FORSU   | 50 |
| <b>Figura 7.8</b>  | TPBM, TPBM <sub>SCL</sub> , TPBM <sub>CL</sub> , PBM <sub>EXP</sub> de la FORSU y sus fracciones  | 53 |
| <b>Figura 7.9</b>  | Caracterización bromatológica y PBM de fracciones y FORSU   | 54 |
| <b>Figura 7.10</b> | Elección de sustratos de referencia   | 55 |
| <b>Figura 7.11</b> | Comparación de fracciones con sustratos de referencia: a) humedad, b) sólidos volátiles, c) demanda química de oxígeno, d) nitrógeno Kjeldahl, e) nitrógeno amoniacal y f) fósforo total. | 57 |
| <b>Figura 7.12</b> | Comparación de fracciones con sustratos de referencia: a) celulosa, b) hemicelulosa, c) lignina, d) carbohidratos totales, e) proteínas y f) grasas                                       | 60 |
| <b>Figura 7.13</b> | Caracterización bromatológica de los sustratos de referencia.   | 62 |
| <b>Figura 7.14</b> | Producción de a) biogás y b) metano de fracción de frutas y sustratos de referencia   | 63 |
| <b>Figura 7.15</b> | Producción: a) biogás y b) metano de fracción de vegetales y sustrato de referencia   | 64 |
| <b>Figura 7.16</b> | Producción: a) biogás y b) metano de fracción de harinas y sustrato de referencia   | 64 |
| <b>Figura 7.17</b> | Producción: a) biogás y b) metano de fracción de poda fresca y sustrato de referencia   | 65 |
| <b>Figura 7.18</b> | Producción de a) biogás y b) metano de fracción de hojas secas y sustrato de referencia   | 66 |
| <b>Figura 7.19</b> | Producción: a) biogás y b) metano de fracción de papel y sustrato de referencia   | 66 |
| <b>Figura 7.20</b> | TPBM, TPBM <sub>SCL</sub> , TPBM <sub>CL</sub> , PBM <sub>EXP</sub> de sustratos de referencia  | 68 |
| <b>Figura 7.21</b> | Producción de metano con respecto al contenido de celulosa  | 69 |
| <b>Figura 7.22</b> | Producción de metano con respecto al contenido de hemicelulosa  | 69 |



|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Figura 7.23</b> | Producción de metano con respecto al contenido de lignina                     | 69 |
| <b>Figura 7.24</b> | PBM obtenido en laboratorio vs PBM calculado en fracciones usando el modelo i | 74 |
| <b>Figura 7.25</b> | Región de rechazo   | 75 |
| <b>Figura B.1</b>  | Producción de biogás de frutas  | 87 |
| <b>Figura B.2</b>  | Producción de biogás de vegetales   | 87 |
| <b>Figura B.3</b>  | Producción de biogás de residuos de origen animal                             | 87 |
| <b>Figura B.4</b>  | Producción de biogás de harinas   | 87 |
| <b>Figura B.5</b>  | Producción de biogás de poda fresca   | 87 |
| <b>Figura B.6</b>  | Producción de biogás de hojas secas   | 87 |
| <b>Figura B.7</b>  | Producción de biogás de ramas   | 88 |
| <b>Figura B.8</b>  | Producción de biogás de papel   | 88 |
| <b>Figura B.9</b>  | Producción de biogás de residuos sin clasificar                               | 88 |
| <b>Figura B.10</b> | Producción de biogás de FORSU   | 88 |
| <b>Figura B.11</b> | Producción de biogás cáscara de naranja.                                      | 88 |
| <b>Figura B.12</b> | Producción de biogás cáscara de plátano.                                      | 88 |
| <b>Figura B.13</b> | Producción de biogás de uvas.   | 89 |
| <b>Figura B.14</b> | Producción de biogás de zanahoria.  | 89 |
| <b>Figura B.16</b> | Producción de biogás de servilletas.  | 89 |
| <b>Figura B.17</b> | Producción de biogás de pasto fresco.   | 89 |
| <b>Figura B.18</b> | Producción de biogás de hojas secas de fresno                                 | 89 |
| <b>Figura C.1</b>  | Producción de metano de frutas  | 90 |
| <b>Figura C.2</b>  | Producción de metano de vegetales   | 90 |
| <b>Figura C.3</b>  | Producción de metano de residuos de origen animal                             | 90 |
| <b>Figura C.4</b>  | Producción de metano de harinas   | 90 |
| <b>Figura C.5</b>  | Producción de metano de poda fresca   | 90 |
| <b>Figura C.6</b>  | Producción de metano de hojas secas   | 90 |
| <b>Figura C.7</b>  | Producción de metano de ramas   | 91 |
| <b>Figura C.8</b>  | Producción de metano de papel   | 91 |
| <b>Figura C.9</b>  | Producción de metano de residuos sin clasificar                               | 91 |
| <b>Figura C.10</b> | Producción de metano de FORSU   | 91 |
| <b>Figura C.11</b> | Producción de metano de cáscara de naranja                                    | 91 |
| <b>Figura C.12</b> | Producción de metano de cáscara de plátano                                    | 91 |
| <b>Figura C.13</b> | Producción de metano de uvas.   | 92 |
| <b>Figura C.14</b> | Producción de metano de zanahoria   | 92 |
| <b>Figura C.15</b> | Producción de metano de tortillas   | 92 |
| <b>Figura C.16</b> | Producción de metano de pasto fresco  | 92 |
| <b>Figura C.17</b> | Producción de metano de hojas secas de fresno                                 | 92 |
| <b>Figura C.18</b> | Producción de metano de servilletas   | 92 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                   | Pág.  |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Tabla 3.1</b>  | Densidad de FORSU de acuerdo con diferentes autores   | 9  |
| <b>Tabla 3.2</b>  | Características químicas de la FORSU de acuerdo con varios autores                          | 11 |
| <b>Tabla 3.3</b>  | Tipos de hidratos de carbono  | 12 |
| <b>Tabla 4.1</b>  | Caracterización bromatológica y PBM de FORSU y fracciones de acuerdo con diferentes autores | 20 |
| <b>Tabla 6.1</b>  | Técnicas analíticas empleadas para caracterizar FORSU y sus componentes                     | 33 |
| <b>Tabla 6.2</b>  | Técnicas analíticas para el análisis bromatológico de la FORSU y sus componentes            | 33 |
| <b>Tabla 6.3</b>  | Métodos realizados para cuantificar la producción de metano                                 | 35 |
| <b>Tabla 7.1</b>  | Descripción de fracciones identificadas en la FORSU de la Ciudad de México                  | 42 |
| <b>Tabla 7.2</b>  | Contenido de humedad, sólidos y relación SV/ST  | 44 |
| <b>Tabla 7.3</b>  | Demanda química de oxígeno, relación DQO/SV, DQO/ST y aporte con respecto a la FORSU        | 44 |
| <b>Tabla 7.4</b>  | Contenido de nitrógeno y fósforo y aporte con respecto a la FORSU                           | 45 |
| <b>Tabla 7.5</b>  | Contenido de material lignocelulósico y aportes con respecto a la FORSU                     | 46 |
| <b>Tabla 7.6</b>  | Contenido de carbohidratos, proteínas y grasas y aportes con respecto a la FORSU            | 48 |
| <b>Tabla 7.7</b>  | Caracterización del inóculo   | 50 |
| <b>Tabla 7.8</b>  | Producción de biogás y metano durante la prueba de PBM                                      | 52 |
| <b>Tabla 7.9</b>  | Contenido de humedad, sólidos y relación SV/ST de los sustratos de referencia               | 56 |
| <b>Tabla 7.10</b> | Demanda química de oxígeno, relación DQO/SV y DQO/ST de los sustratos de referencia         | 58 |
| <b>Tabla 7.11</b> | Nutrientes: nitrógeno y fósforo de los sustratos de referencia                              | 58 |
| <b>Tabla 7.12</b> | Compuestos lignocelulósicos de los sustratos de referencia                                  | 59 |
| <b>Tabla 7.13</b> | Carbohidratos, proteínas y grasas de los sustratos de referencia                            | 61 |
| <b>Tabla 7.14</b> | Producción de biogás y metano durante la prueba de PBM                                      | 67 |
| <b>Tabla 7.15</b> | Estadística descriptiva   | 70 |
| <b>Tabla 7.16</b> | Matriz de correlación   | 71 |
| <b>Tabla 7.17</b> | Regresión lineal de proteínas, grasas y lignina   | 72 |
| <b>Tabla 7.18</b> | Regresión lineal con todas las variables independientes                                     | 72 |
| <b>Tabla 7.19</b> | Datos de regresión lineal y t value   | 73 |
| <b>Tabla A.1</b>  | Camiones seleccionados para obtención de la muestra representativa                          | 86 |
| <b>Tabla D.1</b>  | Estadística descriptiva   | 93 |
| <b>Tabla D.2</b>  | Matriz de correlación   | 94 |
| <b>Tabla D.3</b>  | Carbohidratos degradables (CD), Grasas (G) y lignina  | 94 |
| <b>Tabla D.4</b>  | Regresión lineal con todas las variables independientes                                     | 95 |



## 1. INTRODUCCIÓN

Según la estimación realizada por el Banco Mundial, se prevé que en el 2025 la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel mundial será próxima a 2.2 billones de toneladas por año, cifra cercana al doble de la estimación realizada en 2012 (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012). En México, según la cifra más reciente publicada en 2015, la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, de los cuales el 52% corresponde a la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) (SEMARNAT, 2016).

La FORSU, además de ser el principal componente de los RSU de muchos países, se encuentra dentro del grupo de residuos susceptibles a valorizarse gracias a su capacidad de transformarse en combustibles gaseosos como el metano ( $\text{CH}_4$ ), gas de efecto invernadero objeto del protocolo de Kioto, mediante procesos biológicos como digestión anaerobia.

La tecnología de la digestión anaerobia ha ido evolucionando y hoy en día se traduce en un mercado muy bien establecido en Europa principalmente, aunque también en países en vías de desarrollo está surgiendo como una alternativa de gran interés. A pesar de que en estos países de manera general existe una gran cantidad de biomasa disponible, la falta de información y por ende la desconfianza ante los procesos anaerobios, así como la carencia de incentivos por parte de las autoridades no permite migrar a tecnologías alternativas.

En México se están haciendo esfuerzos para lograr una generación de electricidad a partir de distintos tipos de residuos orgánicos, siendo esta una energía alternativa a los combustibles de origen fósiles. Como muestra de esto se ha llevado a cabo la implementación del programa aprovechamiento energético de residuos urbanos y las modificaciones a su marco legal como es el caso de la Ley de Transición Energética (LTE), con la finalidad de reducir la cantidad de residuos que son destinados a los sitios de disposición final y reincorporar parte de estos a la cadena productiva (SENER, 2017).

Para el uso de la FORSU en la producción de energía es importante conocer la composición de los residuos orgánicos ya que la gran heterogeneidad de la FORSU es una de las principales limitaciones para la producción de biogás (Naroznova *et al.*, 2016). El potencial de producción de metano depende en gran medida de las características del sustrato y de su biodegradabilidad (Campuzano y González-Martínez, 2016). Por lo que, de acuerdo con el proyecto VALORGAS (2010), Kobayashi *et al.* (2012), Naroznova *et al.* (2016), Alibardi y Cossu (2016) es posible caracterizar fracciones individuales no tratadas presentes en la FORSU y de esta forma obtener más información al igual que facilitar la evaluación del ciclo de vida en la gestión de residuos.



Otro aspecto importante relacionado con el análisis de fracciones en la FORSU es determinar cuáles consideraciones se deben hacer para que los residuos sean aceptados dentro de la FORSU. De acuerdo con las pautas de clasificación utilizadas en diferentes países, la asignación a la FORSU de materiales ricos en fibras puede variar significativamente. En México se consideran los residuos de poda y jardinería como parte de la FORSU, así como otros residuos ricos en fibras. Desperdicios de papel, tales como toallas de cocina son aceptados en Reino Unido, Finlandia y Dinamarca. Mientras que los residuos de vegetación no son deseados en Noruega y Suecia (Naroznova *et al.*, 2016).

La principal preocupación con respecto a los residuos ricos en fibras en la FORSU es el contenido de compuestos lignocelulósicos, principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina (Teghammar *et al.*, 2009, Triolo *et al.*, 2011). Parte de la materia orgánica que compone a la FORSU es recalcitrante, contiene carbohidratos y polímeros aromáticos de origen vegetal que inciden en el tiempo de estabilización y en la generación de biogás (Buenrostro-Delgado *et al.*, 2015).

La biomasa lignocelulósica es el principal y más abundante componente producido por la fotosíntesis (Cuervo, 2009). En esta biomasa las cadenas de celulosa se encuentran unidas por puentes de hidrógeno, formando microfibrillas, las cuales se encuentran unidas entre sí por hemicelulosa y cubiertos por lignina (Taherzadeh y Karimi, 2008). Así, la hemicelulosa sirve como una conexión entre la lignina y las fibras de celulosa, dando a la matriz celulosa-hemicelulosa-lignina mayor rigidez (Hendriks y Zeeman, 2009), resultando en un compuesto altamente recalcitrante, resistente al ataque enzimático en los procesos anaerobios. El contenido de fibra en los residuos es un indicador inversamente proporcional a su degradación y se considera el contenido de lignina como un factor negativo que afecta a la producción de metano (Alibardi y Cossu, 2016).

De acuerdo con Campuzano y González-Martínez (2016), los compuestos lignocelulósicos representan aproximadamente el 40% de los sólidos volátiles presentes en los residuos generados en la Ciudad de México. Esto significa que al tener la FORSU 225 g/kg de SV, de cada kg, 135 gramos son realmente aprovechables por los microorganismos responsables de la producción de biogás, mientras que los otros 90 gramos que completan los sólidos volátiles son material de difícil aprovechamiento para la producción de biogás.

El presente trabajo busca determinar la influencia de los compuestos lignocelulósicos presentes en los principales componentes de la FORSU sobre la producción de biogás, permitiendo: identificar y cuantificar las fracciones de la FORSU generada en la Ciudad de México, determinar la producción de biogás y metano por fracción y comparar el contenido de sustancias lignocelulósicas y producción de metano de las fracciones de la FORSU con sustratos de referencia, elegidos a partir de los residuos visualizados durante la caracterización de los mismos.

### **1.1. Objetivo general**

Determinar la influencia de los compuestos lignocelulósicos contenidos en la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos sobre la producción de biogás.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Identificar y cuantificar las fracciones que componen la FORSU de la Ciudad de México.
- Determinar la producción de biogás y metano de cada fracción.



- 
- Comparar el contenido de sustancias lignocelulósicas y producción de metano de las fracciones de FORSU con sustratos de referencia.

### 1.3. Alcances

- Los residuos orgánicos objeto de estudio se obtendrán de la estación de transferencia de residuos sólidos de Coyoacán en la Ciudad de México.
- Los inóculos a utilizar serán lodos anaerobios granulares del reactor UASB de la planta de Grupo Modelo.
- Se utilizará la prueba de potencial bioquímico de metano para determinar la capacidad de generación de biogás de la FORSU y sus componentes.



## 2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

La definición de residuos sólidos urbanos (RSU) varía según los países. En México, la fracción XXXIII del artículo 5 de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR, 2018) define a los residuos sólidos urbanos como: “Los generados en las casas habitación, que resulta de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole”.

El término residuos sólidos urbanos (RSU) es aplicado a una colección heterogénea de los residuos producidos en las zonas urbanas, cuya naturaleza varía de región a región. Las características y la cantidad de los residuos sólidos generados en una región no solo van en función del nivel de vida y estilo de vida de los habitantes de la región, sino también de la abundancia y el tipo de los recursos naturales de la región.

### 2.1. Generación

La generación de residuos urbanos se incrementa día a día conforme aumenta la población. Los actuales niveles mundiales de generación de RSU son de aproximadamente 1,300 millones de toneladas al año, y se espera que aumenten a alrededor de 2,200 millones de toneladas anuales para el 2025. Por mencionar algunos ejemplos, la generación anual de residuos en Asia Oriental y el Pacífico es de aproximadamente 270 millones de toneladas por año. Esta cantidad está influenciada principalmente por la generación de residuos en China, que representa el 70% del total regional. Con una generación de residuos per cápita de 0.44 a 4.3 kg por persona por día. Para Asia Oriental y Central, los residuos generados por año son de al menos 93 millones de toneladas. Mientras que en América Latina y el Caribe la cantidad total de residuos generados por año en esta región es de 160 millones de toneladas, con valores per cápita de 0.1 a 1.4 kg/cápita/día, y un promedio de 1.1 kg/hab·día (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012).

La generación de grandes cantidades de RSU representa un grave problema a nivel internacional debido al desmedido crecimiento demográfico lo que provoca el aumento en el consumo de bienes y servicios y como consecuencia el acelerado desarrollo industrial. En los países industrializados la creciente generación de residuos se está convirtiendo en uno de los mayores problemas ambientales. Los efectos negativos producidos por el mal manejo de estos



recursos pueden ser reducidos atacando el problema desde la raíz y reflexionando de manera profunda sobre cómo se producen y utilizan.

México ocupa uno de los primeros lugares en la generación de residuos sólidos en América Latina, mientras que en 2001 se producían 31.5 millones de toneladas, en el 2013 aumentó a 42.9, lo que implica un incremento de 1 millón de toneladas por año (INEGI, 2013). Esto se debe a diversos factores, entre los cuales se encuentran el crecimiento de la población, el desarrollo industrial, la urbanización, y los nuevos estilos de vida de la población. Tan solo entre 2003 y 2011 creció 25 %, principalmente como resultado del crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas, el gasto de la población y el cambio en los patrones de consumo (SEDESOL, 2012).

## 2.2. Composición

A medida que un país se desarrolla y su riqueza aumenta, la composición de su flujo de residuos se vuelve más variada y compleja. La Figura 2.1 muestra la alta proporción de RSU ricos en componentes orgánicos en países con un ingreso medio-bajo con un producto interno bruto per cápita menor a 12,196 dólares, mientras que en los países de ingreso alto los flujos de RSU contienen una gran proporción de plásticos y papel.

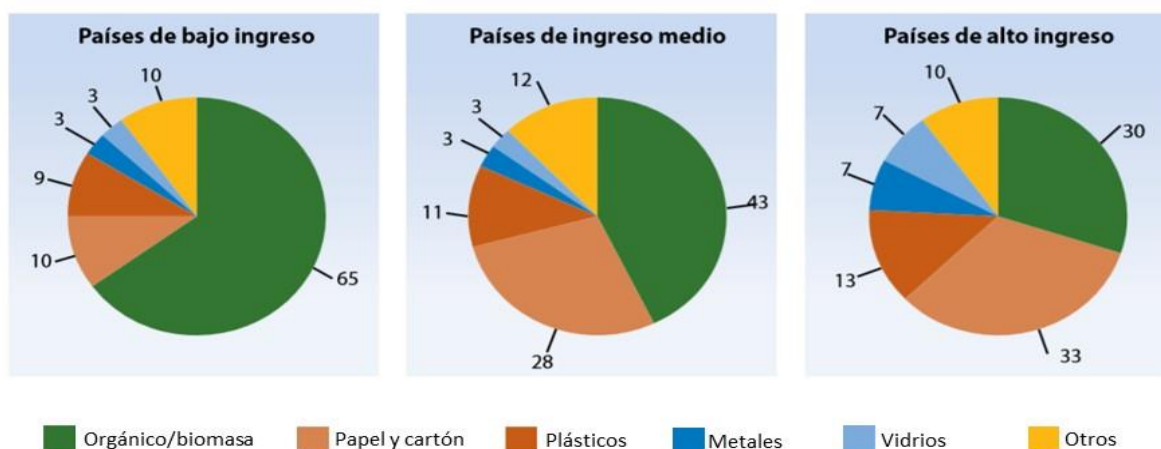


Figura 2.1. Composición de los residuos sólidos urbanos en el mundo (UNEP, 2015)

Debido a la gran cantidad y variedad de residuos generados es necesario conocer la composición de los residuos sólidos urbanos para evaluar el tipo de tratamiento al que pueden ser susceptibles, dimensionar de esta forma la infraestructura requerida y optar por el sistema de gestión más adecuado de los mismos.

En la Figura 2.2 se muestra la composición de los RSU generados en México. Su composición (Figura 2.2) consiste en: 52% de residuos orgánicos (restos de comida, de jardines y otros materiales similares), 36% de los residuos tienen un alto potencial de reciclaje (14% papel y cartón, 6% vidrio, 11% plásticos, 4% metales y 1% de textiles) y el 12 % restante corresponde a otros materiales. Se puede apreciar que más de la mitad de estos residuos corresponden a la fracción orgánica, esta materia prima puede ser empleada en tratamientos biológicos, aprovechando su biodegradabilidad. Se estima que solo se recolecta el 87% de los residuos sólidos generados y, de éstos, el 6% de los materiales son reciclados, el 66% se dispone en

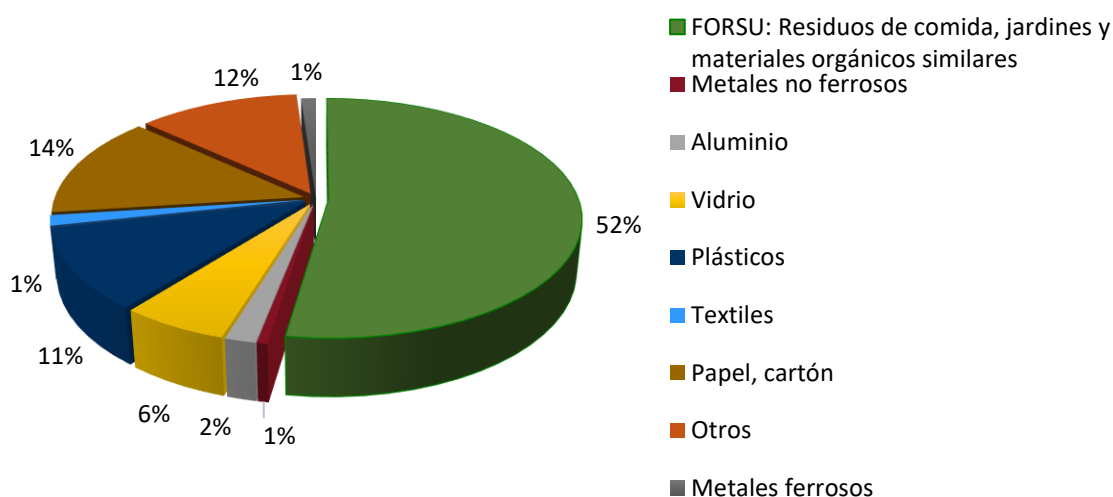




rellenos sanitarios y sitios controlados y el 28% restante se dispone de manera inadecuada en tiraderos a cielo abierto (INEGI, 2013).

### 2.3. Gestión

La gestión de residuos sólidos urbanos (GRSU) es un proceso complejo que incluye desde la generación, almacenamiento, recolección, tratamiento y disposición, rutas de recolección de residuos, ubicación de las estaciones de transferencia, estrategia de tratamiento, ubicación de la planta de tratamiento y recuperación de energía. Con el fin de diseñar y establecer una adecuada GRSU los tomadores de decisiones deben establecer metas locales y regionales en todas o algunas de estas etapas y planificar una estrategia de gestión. Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre las estrategias de GRSU solo se han centrado en dos etapas principales: la estrategia de tratamiento de residuos y la ubicación de la planta de tratamiento debido a la magnitud de sus impactos ecológicos y financieros (Soltani *et al.*, 2015).



**Figura 2.2.** Composición los RSU en 2012 (elaboración propia a partir de SEMARNAT, 2016)

El manejo de los residuos sólidos urbanos cobra gran relevancia ambiental en virtud del impacto que tienen sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos con afectaciones a la flora, fauna y vida humana, además de ser una fuente importante de generación de gas metano que influye en el calentamiento del planeta (por ser un gas de efecto invernadero).

En el tratamiento de residuos sólidos existen diferentes tipos de tratamientos: La opción más deseable es el tratamiento con mayor capacidad de retorno relativo al origen y la opción menos deseable es disponer de los residuos sin recuperación de cualquiera de los materiales y/o energía. Entre estos dos extremos hay una amplia variedad de opciones de tratamiento de residuos que puede ser utilizado como parte de una estrategia de gestión de residuos para recuperar materiales: por ejemplo, reutilización, reciclaje, compostaje de residuos orgánicos, generación de energía a través de incineración, o digestión anaerobia (DA) de los residuos orgánicos. Hay una amplia variedad de alternativas de gestión de residuos para tratar los RSU (DEFRA, 2013).



### 3. CARACTERÍSTICAS DE LA FORSU

El análisis de los residuos municipales es fundamental para el diseño de tratamientos, procesos y estrategias de reciclaje. La caracterización de los residuos se dificulta debido a su heterogeneidad física y química (Buffiere *et al.*, 2006), por lo que el conocimiento de la composición y características de la FORSU es clave en el potencial de recuperación de nutrientes y en la producción de biogás, y además afecta a la calidad del digestato (Al Seadi y Lukehurst, 2012). También es importante para cuantificar los componentes dañinos como valiosos en los residuos sólidos y para estimar la producción de metano (Campuzano y González-Martínez, 2016).

#### 3.1. Características físicas

Heterogeneidad de la FORSU. Es una de las principales limitaciones para la producción de biogás, ya que su composición depende de varios factores como de la región geográfica, el número de habitantes, nivel socioeconómico de la población, actividades económicas predominantes, hábitos alimenticios regionales, patrones de consumo, variaciones estacionales (desechos de jardín, el consumo de fruta), variaciones periódicas (actividades recreativas, actividades rurales o urbanas), sistema de recolección, separación de fuentes y eficacia de recolección, entre otros (VALORGAS, 2010).

La definición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos varía de forma regional y nacional; en Estados Unidos, la FORSU se considera una mezcla de alimentos, desechos de jardín y papel. En la Unión Europea se considera una mezcla de residuos de parques, jardines y cocinas. Según Mata-Alvarez (2003), si se trata de la fuente ordenada, separada mecánicamente o recolección por separado, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) comprenden putrescible, papel, madera y plástico. Desperdicios de papel, tales como toallas de cocina son aceptados en Reino Unido, Finlandia y Dinamarca. Los residuos de vegetación no son deseados en Noruega y Suecia (Naroznova *et al.*, 2016) mientras que en México se consideran los residuos de poda y jardinería como parte de la FORSU, así como otros residuos ricos en fibras.

Tamaño de partícula. Independientemente de cómo se separen las fracciones de la FORSU, cada una de ellas es diferente, especialmente relacionado con el tamaño (VALORGAS, 2010). Dentro de la FORSU una gama de materiales se consideran impurezas físicas debido a que se trata de materiales no digeribles o incluso se pueden considerar como impurezas a partículas digeribles, pero de muy grande tamaño (Al Seadi y Lukehurst, 2012).



El tamaño de las partículas tiene una influencia directa en el proceso de digestión anaerobia donde las partículas más grandes toman más tiempo para producir biogás (Zhang y Banks, 2013). Debido a la heterogeneidad de los materiales que componen la FORSU es posible encontrar residuos demasiado grandes por lo que se necesita reducir su tamaño mediante trituración, cortado o cualquier otro proceso adecuado antes de usarlo para la producción de biogás (Al Seadi y Lukehurst, 2012).

La reducción del tamaño de partícula causa un consecuente aumento de la superficie disponible y mejora el proceso biológico. Para sustratos con un alto contenido en fibras y baja biodegradabilidad se originan mejores rendimientos en la producción de biogás ya que se presenta una reducción en el tiempo necesario para la digestión (Fernández, 2008). Esto conlleva una disminución en la cantidad de residuos que deben eliminarse y una mayor cantidad de gas útil en el digestor (Izumi *et al.*, 2010).

*Impurezas físicas no deseadas.* Diferentes materiales y sustancias se consideran perjudiciales para la digestión anaerobia, tales como bolsas de plástico, etiquetas de identificación de materiales, arena, piedras, caucho, vidrio, madera, material de embalaje y desechos de jardín voluminosos. La adecuada separación en el lugar y la recolección selectiva evita la presencia de estas "impurezas", de lo contrario será necesaria una separación mecánica y los costos de procesamiento puede aumentar (Al Seadi y Lukehurst, 2012).

También existen otros compuestos orgánicos que pueden ser perjudiciales para la digestión anaerobia y puede disminuir la calidad del digestato, tales como cáscaras de huevo, semillas y huesos. Las partículas grandes no biodegradables y biodegradables son consideradas impurezas físicas (VALORGAS, 2010).

Un digestato de alta calidad para uso como fertilizante se define esencialmente por las siguientes características: contenido de nutrientes, pH, materia seca, homogeneidad, pureza (libre de impurezas inorgánicas como el plástico, piedras, vidrio, etc.), sanitizado y seguro para organismos vivos (Al Seadi y Lukehurst, 2012).

*Densidad.* Es un parámetro que a menudo se utiliza para realizar cálculos en el proceso de digestión anaerobia y analizar el comportamiento de los digestores, pero pocos autores informan sobre este parámetro. Los residuos que presentan la mayor densidad reportan una menor presencia de compuestos contaminantes.

La Tabla 3.1 presenta valores de densidad que varían desde 328 hasta 1,052 kg/m<sup>3</sup>. Los residuos con mayor densidad contienen sustancias y materiales menos deseados. De todos los informes y estudios que se encuentran, en Cádiz, España, se reportan residuos con la menor densidad, baja biodegradabilidad y mayores cantidades de materiales no deseados (Campuzano y González-Martínez, 2016).

### **3.2. Características químicas**

De acuerdo con Campuzano y González-Martínez (2016), desde el punto de vista químico, la FORSU tiene tantas características como componentes que la constituyen.

En la Tabla 3.2 se presentan caracterizaciones de la FORSU desde el punto de vista químico de 29 ciudades de 14 países diferentes. Se muestran parámetros que se determinan de forma común en todos los trabajos encaminados a utilizar FORSU como sustrato en digestión anaerobia como son humedad, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos (SF),



relación SV/ST. Se muestran también parámetros que se determinan de forma menos frecuente como: nitrógeno Kjeldahl (NK) y fósforo total (PT) en base húmeda. Así como datos de composición elemental en base seca y DQO.

**Tabla 3.1.** Densidad de FORSU de acuerdo con diferentes autores (Campuzano y González-Martínez, 2016).

| Fuente  | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Referencia                               |
|---|-------------------------------|--|
| FORSU recolectada en fuente. Tamaño original. | 750                           | Antognoni <i>et al.</i> , 2013           |
| FORSU separada mecánicamente                  | 790-810                       | Romero Aguilar <i>et al.</i> , 2013      |
| FORSU secada a 105°C                          | 666                           | Fernández-Rodríguez <i>et al.</i> , 2013 |
| FORSU separada con sistema acuoso tipo pulper | 933                           | Dong <i>et al.</i> , 2010                |
| FORSU separada mecánicamente y triturada      | 328                           | Forster-Carneiro <i>et al.</i> , 2008    |
| FORSU   | 1052                          | Castillo <i>et al.</i> , 2006            |
| Residuos de comida                            | 513                           | Han and Shin, 2002                       |

De 14 trabajos que reportan el pH de la FORSU todos indican que es ácida, con valores entre 4.1 y 6.2 y un promedio de 5.4. El rango de ST va de 15 a 50.2% y la humedad, que complementa el 100% de la muestra, oscila entre 49.8 y 85%. Son nueve los autores que reportan un contenido de sólidos inferior al 25%; en el resto de los trabajos este valor es superior al 25%. El valor reportado por Zhu *et al.* (2010) es el más alto, con 50.2%, lo cual se debe a la forma de separación de la FORSU que emplea aire y posiblemente afecte a la humedad natural de la muestra (Campuzano y González-Martínez, 2016). El promedio de los valores reportados fue de 27.4% y de 72.6% para ST y humedad, respectivamente.

El contenido de SV varió de forma importante con valores entre 7.4 y 36.1%, lo cual se traduce en un amplio intervalo para la relación SV/ST, que va de 43 a 95%. Este amplio intervalo puede ser explicado por las diferentes concepciones que existen de FORSU, así como a la gestión y tratamiento que reciben los residuos previamente a su caracterización. La relación SV/ST de 43% reportada para los residuos de Cádiz, España, fue la más baja.

Fósforo y nitrógeno Kjeldahl son características se usan para determinar de forma preliminar el contenido de materia biodegradable y la relación de nutrientes en el sustrato. Los datos de PT oscilaron entre 0.4 y 1.9 g/kg con promedio de 1.2 g/kg y de NK el rango fue de 1.04 a 28 g/kg con un promedio de 7.7 g/kg. De acuerdo con Buffiere *et al.* (2006), la composición elemental de los residuos es la clave para evaluar la recuperación de sus nutrientes como el nitrógeno, fósforo y carbono; además permite estimar valores teóricos de producción de biogás a partir de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (Nielfa *et al.*, 2015).

Sin embargo, se ha observado que estos datos se encuentran en menor medida en literatura porque la mayoría de los autores están interesados en la FORSU para la producción de biogás (materia orgánica) y la composición elemental no es básicamente requerido para este propósito, ya que únicamente la materia orgánica de la FORSU (SV) es consumida por los microorganismos para producir biogás y la composición elemental cuantifica tanto los SV como la parte inerte (SF) de la FORSU.

De acuerdo con el estudio de VALORGAS (2010), indistintamente de las diferencias en las fracciones que componen la FORSU, la composición elemental no varía significativamente. El contenido de carbono oscila entre 37.6 y 51.3 %ST con un promedio de 46.6%ST; los valores más bajos son los reportados en Udine, Italia, y en Cantón, China, con 37.6% y en Indore,



India, con 40%. El resto de los datos son superiores a 46.7%. Los reportes del contenido de hidrógeno, nitrógeno y azufre son más parecidos y sus promedios son 6.7%ST, 2.8%ST y 0.18%ST, respectivamente.

Por último, la tabla muestra los valores de DQO de FORSU. Pocos estudios presentan esta determinación debido a la complejidad derivada de la heterogeneidad de la FORSU y tamaño de partícula. Además, al procesar FORSU para la producción de biogás, la mayoría de los valores se informan con relación a SV. Los valores mostrados varían significativamente entre 140 y 575 g/kg y pueden relacionarse con la relación SV/ST: cuanto mayor es la relación SV/ST, mayor es la DQO: para una DQO de 575 g/kg, la relación VS/TS es 0.92 y para una DQO de 140 g/kg, la relación es 0.43.

### 3.3. Características bromatológicas

Son pocos los estudios que determinan las características de los componentes orgánicos en la FORSU, por lo que, considerando que los residuos provienen principalmente de restos de alimentos, es posible realizar su análisis desde una perspectiva bromatológica mediante un análisis químico proximal, el cual permite identificar la cantidad de nutrientes que componen la FORSU como son: carbohidratos, proteínas, grasas y aceites, fibras, entre otros.

Debido a diferencias en las características del sustrato, inóculos y parámetros de digestión hay poca información que evalúa la influencia de la composición orgánica en el proceso de mono-digestión (Li *et al.*, 2017). La digestión anaerobia (DA) se ha utilizado ampliamente para tratar residuos de alimentos y el rendimiento de la digestión (por ejemplo: la producción de biogás, reducción orgánica, características de inhibición y estabilidad del proceso) y depende en gran medida de las características de la materia prima (Wagner *et al.*, 2013).

Las composiciones orgánicas de residuos a menudo varían con factores como la disponibilidad de alimentos, la variación estacional y los patrones de consumo (Kobayashi *et al.*, 2012). Así como la separación y el almacenamiento o el tiempo de transporte de la FORSU pueden cambiar la composición en un corto período de tiempo.

De acuerdo con Nielfa *et al.* (2015) la degradabilidad anaerobia de la FORSU depende de su composición en términos de carbohidratos, proteínas, lípidos y compuestos escasamente degradables como las fibras. Mientras que Hartmann y Ahring (2006) señalan que el potencial de biogás depende en gran medida de la calidad y biodegradabilidad del sustrato, especialmente en los contenidos de macromoléculas como lignocelulosas.

Carbohidratos. Los hidratos de carbono (también llamados glúcidos o glícidos) constituyen una parte fundamental de la alimentación (Mataix, 2011). En la tabla 3.1 se indican los distintos hidratos de carbono. Los carbohidratos se consideran el componente orgánico más importante de los residuos sólidos municipales para la fermentación (Dong *et al.*, 2009). Los principales componentes son fibra cruda, carbohidratos solubles e insolubles (celulosa, hemicelulosa y pectina) y almidón (Sanders, 2001). Tanto la celulosa como la hemicelulosa se encuentran en los grupos de fibras y carbohidratos en bruto.

Yang *et al.* (2015) muestran que los primeros 3 días de digestión fueron una fase de retraso para la degradación de proteínas en comparación con la degradación rápida de carbohidratos al inhibirse la formación de proteasas. La eficiencia final de degradación de proteínas y carbohidratos es del 35% y 50%, respectivamente.



**Tabla 3.2.** Características químicas de la FORSU de acuerdo con varios autores (adaptación de Campuzano y González-Martínez, 2016)

| País            | Localidad        | pH   | H    | ST   | SV    | SV/ST | NK   | PT   | Composición elemental |     |     |      | DQO  | Referencia                      |
|-----------------|------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|-----------------------|-----|-----|------|--|---------------------------------|
|                 |                  |      |      |      |       |       |      |      | C                     | H   | N   | S    |  |                                 |
| India           | Kerala           | 6.2  | 81.3 | 18.7 | 16.94 | 90.6  | 1.04 | -    | -                     | -   | -   | -    | Sajeena Beevi <i>et al.</i> , 2015         |                                 |
|                 | Indore           | -    | 85   | 15   | 13.3  | 88.5  | 1.65 | -    | 40.0                  | -   | -   | -    | Rao y Singh, 2004                          |                                 |
| Italia          | Padua            | -    | 69.5 | 30.5 | 28.06 | 92.0  | 7.7  | 1.16 | -                     | -   | -   | -    | 575 Alibardi y Cossu, 2015                 |                                 |
|                 | Lacchiarella     | 4.32 | 77.7 | 22.3 | 19.7  | 88.3  | 4.01 | -    | 49.0                  | -   | -   | -    | Pognani <i>et al.</i> , 2015               |                                 |
|                 | Udine            | -    | 70   | 30   | 27.5  | 92    | 7.2  | 0.63 | 37.6                  | 5.6 | 2.8 | -    | Cabbai <i>et al.</i> , 2013                |                                 |
|                 | Perugia          | -    | 81.1 | 18.9 | 15.8  | 84    | -    | -    | -                     | -   | -   | -    | Fantozzi y Buratti, 2011                   |                                 |
|                 | Milán            | 4.38 | 75.8 | 24.2 | 22.2  | 91.6  | 5.0  | 0.5  | -                     | -   | -   | -    | Schievano <i>et al.</i> , 2010             |                                 |
|                 | Verona           | -    | 71.2 | 28.8 | 22.8  | 79    | 28   | 2.4  | -                     | -   | -   | -    | 347 Bolzonella <i>et al.</i> , 2005        |                                 |
|                 | Treviso          | 6.2  | 72.5 | 27.5 | 23.6  | 86.6  | 7.0  | 1.0  | 47.2                  | -   | 2.6 | -    | -  |                                 |
| Finlandia       | Forssa           | 5.3  | 73.0 | 27.0 | 24.9  | 92.3  | 6.5  | 0.7  | 49.4                  | -   | 2.5 | -    | -  |                                 |
| Portugal        | Lisboa           | -    | 66.2 | 33.8 | 27.6  | 81.7  | 5.1  | 1.7  | -                     | -   | -   | -    | VALORGAS, 2010                             |                                 |
| Reino Unido     | Luton            | 5.1  | 76.3 | 23.7 | 21.8  | 91.3  | 7.4  | 1.2  | 51.2                  | 6.6 | 3.1 | 0.2  | -  |                                 |
|                 | Eastleigh        | 5.7  | 71.4 | 28.6 | 26.8  | 94.2  | 7.8  | 0.8  | 48.8                  | 6.4 | 2.9 | -    | -  |                                 |
|                 | Southampton      | -    | 72.3 | 27.7 | 24.4  | 88    | 8.9  | 1.9  | -                     | -   | -   | -    | Banks <i>et al.</i> , 2011                 |                                 |
| Irlanda         | Cork             | 4.1  | 70.6 | 27.7 | 28    | 95    | 10.4 | -    | 49.6                  | 7.3 | 3.5 | -    | Browne y Murphy, 2013                      |                                 |
| Líbano          | Beirut           | -    | 81.4 | 18.6 | 17.2  | 92.6  | -    | 0.7  | -                     | -   | -   | -    | Ghanimeh <i>et al.</i> , 2012              |                                 |
| Republica Checa | Praga            | 5.95 | 67.5 | 32.5 | 23.1  | 71.0  | 4.5  | 0.7  | -                     | -   | -   | -    | Hanc <i>et al.</i> , 2011                  |                                 |
| España          | Barcelona        | -    | 71   | 29   | 22.3  | 77    | 5.3  | -    | -                     | -   | -   | -    | Ponsá <i>et al.</i> , 2011                 |                                 |
|                 | Cádiz            | 7.9  | 82.8 | 17.2 | 7.4   | 43    | 26.0 | -    | -                     | -   | -   | -    | 140 Forster-Carneiro <i>et al.</i> , 2008b |                                 |
| China           | Cantón           | 5.3  | 81.6 | 18.4 | 11.3  | 61.6  | 4.2  | 0.4  | 37.7                  | 5.7 | 3.3 | 0.1  | -  | Dong <i>et al.</i> , 2010       |
| EEUU            | Arizona          | 5.4  | 49.8 | 50.2 | 36.1  | 71.9  | 1.9  | 0.5  | -                     | -   | -   | -    | Zhu <i>et al.</i> , 2010                   |                                 |
|                 | California       | -    | 69.1 | 30.9 | 26.4  | 85.3  | 9.8  | 1.6  | 46.8                  | -   | 3.2 | -    | Zhang <i>et al.</i> , 2007                 |                                 |
| Alemania        | Karlsruhe        | 5.1  | 74.5 | 25.5 | 22.5  | 88.2  | 7.8  | -    | -                     | -   | -   | -    | 350 Nayono <i>et al.</i> , 2009            |                                 |
| Dinamarca       | Copenhague       | -    | 71.7 | 28.3 | 25.0  | 88    | 7.4  | 1.4  | 49.0                  | 7.2 | 2.6 | 0.2  | -  | Davidsson <i>et al.</i> , 2007  |
|                 |                  | -    | 70.5 | 29.5 | 27.5  | 93.3  | -    | 1.2  | 51.3                  | 7.5 | 2.4 | 0.2  | -  |                                 |
|                 | Aalborg          | -    | 70   | 29.4 | 25.2  | 85.6  | -    | 1.5  | 46.7                  | 6.8 | 2.4 | 0.2  | -  | Hansen <i>et al.</i> , 2007a    |
|                 | Kolding          | -    | 68.3 | 31.7 | 26.4  | 83.4  | -    | 1.6  | 47.5                  | 7.0 | 2.6 | 0.2  | -  |                                 |
|                 | Grindsted        | -    | 64.4 | 35.6 | 30.7  | 86.2  | 6.3  | -    | -                     | -   | -   | -    | 431 Hartmann y Ahring, 2005                |                                 |
|                 | Gistrup          | 4.6  | 70   | 30   | 24.4  | 81    | 6.5  | -    | -                     | -   | -   | -    | -  | Angelidaki <i>et al.</i> , 2006 |
| México          | Ciudad de México | -    | 70.3 | 29.7 | 22.3  | 75.1  | 5.4  | 1.8  | -                     | -   | -   | -    | 304 Campuzano y González-Martínez, 2015    |                                 |
| <b>Promedio</b> |                  | 5.4  | 72.6 | 27.4 | 23.0  | 83.9  | 7.7  | 1.2  | 46.6                  | 6.7 | 2.8 | 0.18 | 358  | -                               |

H: Humedad (%), ST: Sólidos totales (%), SV: Sólidos volátiles (%), NK: Nitrógeno Kjeldahl (g/kg), PT: Fósforo total (g/kg), C: carbón (%), H: hidrógeno (%), N: nitrógeno (%), S: azufre (%), DQO: demanda química de oxígeno (gO<sub>2</sub>/kg)



**Tabla 3.3.** Tipos de hidratos de carbono (Mataix, 2011)

|                         | <b>Grado de polimerización</b>                        | <b>Subgrupo</b>   |
|-------------------------|---|---|
| <b>Azúcares simples</b> | Monosacáridos   | Glucosa, fructosa, galactosa  |
|                         | Disacáridos   | Sacarosa, lactosa, maltosa  |
| <b>Oligosacáridos</b>   | $\alpha$ -glucanos (maltodextrinas)                   | Productos de hidrólisis parcial de almidón                                    |
|                         | No $\alpha$ -glucanos (fructooligosacáridos)          | Galactooligosacáridos (rafinosa, estaquiosa y verbascosa). Diversas inulinas. |
| <b>Polisacáridos</b>    | $\alpha$ -glucanos (almidones)                        | Amilosa<br>Amilopectina   |
|                         |   | Pared celular:<br>-Celulosa<br>-Hemicelulosa                                  |
|                         | No $\alpha$ -glucanos (polisacáridos no almidonáceos) | -Pectinas<br>De depósito:<br>-Guar<br>-Inulina                                |
|                         |   | Gomas, exudados y mucílagos   |

Labatut *et al.* (2011) concluyen que los rendimientos de metano más altos se obtuvieron utilizando sustratos ricos en lípidos y carbohidratos, mientras que los rendimientos más bajos de sustratos más recalcitrantes con alta fracción lignocelulósica. Sobre esto, Xu *et al.* (2014) notaron que se afecta negativamente la producción de metano por el contenido de lignina, por lo que no es deseable en los desechos, mientras que la celulosa y otros compuestos extraíbles tienen un efecto positivo en la producción de metano.

Alibardi y Cossu (2015) determinaron una menor producción de metano a partir de desechos que contiene un alto contenido de carbohidratos. Li *et al.* (2017) manifiestan que los sustratos ricos en carbohidratos dan como resultado relaciones C/N indeseables debido a limitaciones de nutrientes y acidificación rápida.

Lípidos. Los lípidos pueden ser de origen animal o vegetal y están constituidos por muchos compuestos químicos que comparten su insolubilidad en agua y solubilidad en disolventes orgánicos. Desde un punto de vista alimentario, los componentes lipídicos cualitativa y cuantitativamente más importantes y característicos son los triglicéridos. Estos compuestos son ésteres de glicerol con ácidos grasos que tienen gran contenido energético: proporcionan alrededor de 9 kcal/g frente a 4 kcal/g que originan los carbohidratos y las proteínas. Otros lípidos alimentarios son los lípidos complejos (glicerolípidos y esfingolípidos) y el colesterol (Mataix, 2011).

La naturaleza hidrofóbica de las grasas y aceites los hace insolubles en agua y se adhieren fácilmente a las partículas de desecho (Sanders, 2001). Las grasas y aceites son frecuentemente encontrados en los desechos provenientes de los mataderos, la industria procesadora de alimentos y en varios países en la industria de molienda de aceitunas. Durante la digestión anaerobia las grasas y aceites son fácilmente hidrolizadas a ácidos grasos de cadena larga y luego a acetato e hidrógeno y estas son recibidas como sustrato debido a los altos rendimientos de metano (Wan *et al.*, 2011). El glicerol y los ácidos grasos de cadena larga se producen principalmente a partir de la hidrólisis anaerobia de lípidos. Las degradaciones de ácidos grasos de cadena larga son reacciones termodinámicamente desfavorables a menos que la presión parcial de hidrogeno se mantenga en un nivel extremadamente bajo (Okamoto *et al.*, 2000). Además, lleva mucho tiempo degradar los



ácidos grasos de cadena larga por bacterias anaerobias, ya que los ácidos grasos de cadena larga inhiben a las bacterias anaerobias al adherirse a la pared celular y disminuyen la eficiencia del transporte de nutrientes (Alibardi y Cossu, 2016).

El valor energético de los lípidos los convierte en cosustratos ideales para aumentar la viabilidad económica de cualquier planta de DA basada en conceptos de codigestión. La red la producción de energía aumenta significativamente si una fracción de los lípidos residuales se mezcla en la materia prima. Sin embargo, sin una adecuada estrategia de alimentación, la adición de lípidos residuales a una planta de DA es arriesgado, si la acumulación de ácidos grasos de cadena larga no se previene. Comprender la degradación anaerobia de los lípidos tiene por lo tanto un impacto económico inmediato en las plantas de DA (Alves *et al.*, 2009).

Proteínas. Las proteínas son macromoléculas constituidas a partir de aminoácidos que desempeñan funciones diversas, todas ellas de extraordinaria importancia, en los seres vivos. Su nombre alude precisamente a esta característica (proteos: primera categoría). Los aminoácidos son moléculas de bajo peso molecular con una parte común, la agrupación alfa-amino-carboxilo, y otra variable de gran diversidad. Además del carbono, hidrógeno y el oxígeno los aminoácidos contienen nitrógeno en su grupo amino. Aparte de su contribución a la estructura y función de los aminoácidos, este nitrógeno es la fuente de todos los grupos nitrogenados del resto de moléculas biológicas en el organismo. Algunos aminoácidos también contienen azufre en su molécula (Mataix, 2011).

Durante la digestión anaerobia de proteínas, el azufre puede conducir a la formación de sulfuro de hidrógeno como constituyente de biogás (Campuzano y González-Martínez, 2015). Las proteínas son fácilmente biodegradables en condiciones anaerobias. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional.

Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas extracelulares llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amoníaco y sulfuro en posteriores etapas del proceso. La degradación de proteínas a los ácidos orgánicos se produce por medio de tres vías: la reacción de Stickland, desaminación oxidativa del único aminoácido y desaminación reductiva del único aminoácido. La primera reacción controla casi el 90% de la degradación, la segunda, con hidrógeno como uno de los productos, requiere valores extremadamente bajos de presión parcial de hidrógeno, mientras que la tercera consume hidrógeno (Alibardi y Cossu, 2016).

La presencia de proteínas puede mejorar el proceso de fermentación al proporcionar los nutrientes necesarios para la célula en crecimiento (Alibardi y Cossu, 2016). Sin embargo, la degradación de aminoácidos implica reacciones que consumen hidrógeno y estudios han demostrado que los sustratos ricos en proteínas producen niveles más altos de amoníaco que inhiben a las arqueas metanogénicas (Li *et al.*, 2017). La concentración de amoníaco producido se correlaciona con la cantidad de aminoácidos (proteínas) degradados. Por lo tanto, el grado de la degradación proteica se puede conocer observando la concentración de amoníaco (Okamoto, 2000).

Fibra. La denominada fibra alimentaria se encuentra únicamente en los alimentos de origen vegetal y en ningún caso en los de procedencia animal. Por ello la ingestión de fibra se

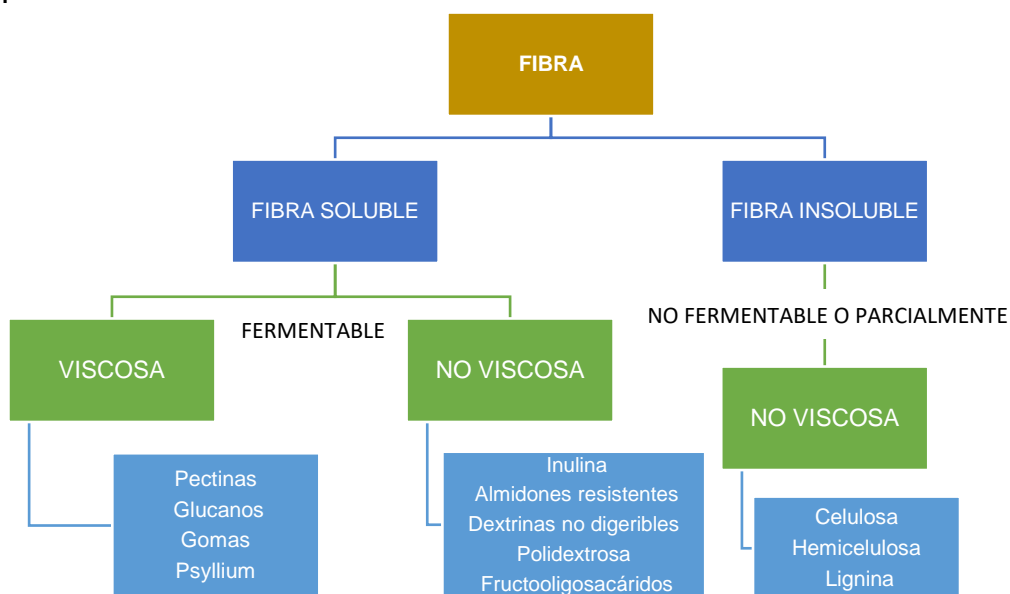




hace a partir de los cereales y sus múltiples derivados, tubérculos y raíces feculentas, frutas, verduras y hortalizas y legumbres. También se puede encontrar fibra en productos precocinados o manufacturados en los cuales la fibra se suele utilizar como aditivo con finalidades tecnológicas.

La fibra se puede clasificar de muchas maneras posibles, ya sea, sobre la base de las fuentes de las cuales son derivados o sobre la base de la estructura. En esta última, se pueden clasificar en polisacáridos lineales o no lineales. Pero el sistema de clasificación ampliamente aceptado y utilizado está en la base de la solubilidad y/o el comportamiento de fermentación. De acuerdo con su solubilidad en agua, la fibra dietética se clasifica convencionalmente en fibra insoluble/menos fermentada y fibra soluble/fibra bien fermentada. La fibra insoluble consiste en celulosa, parte de hemicelulosa y lignina y la fibra soluble se compone de pentosanos, pectinas, gomas y mucílagos. Van Soest y Robertson (1976) informaron que se aporta la cantidad máxima de hemicelulosa en la dieta por salvado y cascarillas (Mehta *et al.*, 2015). La clasificación de la fibra de acuerdo con sus propiedades químicas se muestra en la Figura 1.

Existe otra clasificación que podría ser quizás la menos utilizada: viscoso y no viscoso, surge del hecho de que se han reportado beneficios atribuidos a la fibra relacionados con su viscosidad: capacidad de retención de agua. Como fibra viscosa están: gomas, pectina, celulosa, psyllium y xantana, y no viscosa: inulina, almidón resistente, polidextrosa (Ruíz, 2016).



**Figura 3.1.** Clasificación de la fibra con base a sus propiedades químicas (Mehta *et al.*, 2015)



## 4. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El proceso de digestión anaerobia se configura como uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento del valor fertilizante de los productos tratados. Es un proceso por el cual casi cualquier desecho orgánico puede transformarse biológicamente en otra forma, en ausencia de oxígeno (Khalid *et al.*, 2011). Consiste en una serie de reacciones bioquímicas complejas catalizadas por diferentes consorcios de microorganismos y reacciones fisicoquímicas de asociación y disociación de iones y transferencia gas-líquido (Burke, 2001).

Como producto de valor de este proceso se obtiene biogás, que es una mezcla de metano, dióxido de carbono y trazas de otros gases (Burke, 2001). La composición de biogás varía dependiendo del sustrato y los microorganismos, pero una composición típica es de 70% de metano, 25-30% de dióxido de carbono y 0.5% de sulfuro de hidrógeno y trazas de otros gases (Campuzano y González- Martínez, 2015).

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que la materia orgánica mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se transforma en productos gaseosos o "biogás" ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.) y en un digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K Ca, etc.) y compuestos de difícil biodegradación (IDAE, 2007). De acuerdo con Novarino y Zanetti (2008), la digestión anaeróbica es una forma de tratar la fracción orgánica de RSU con el fin de proporcionar un producto estabilizado y tener como consecuencia la producción de biogás, un gas rico en metano (50 - 70% v/v) con un alto poder calorífico que puede usarse como combustible.

En los últimos años el proceso de digestión anaerobia se ha presentado como una de las principales opciones para el manejo sustentable de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) gracias a su alta recuperación de energía y su limitado impacto al ambiente. El proceso de digestión anaerobia se divide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Mata-Alvarez, 2003). El primer esquema de la ruta bioquímica del proceso fue propuesto por Gujer y Zehnder en 1983 para la digestión de lodos y es la misma ruta que siguen los sustratos complejos como la FORSU.

### 4.1. Etapas

Hidrólisis. Es la primera etapa del proceso de digestión anaerobia, por lo que para que los microorganismos puedan acceder al potencial de energía química de la materia orgánica, las cadenas largas de las moléculas orgánicas deben ser fragmentadas a sus partes



constituyentes, los monómeros. Estos monómeros como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena corta y larga (provenientes de los carbohidratos, proteínas y lípidos, respectivamente) están en estado de biodisponibilidad y los microorganismos pueden usarlos para nutrirse (Zupancic y Grilic, 2012). Los procesos de ruptura de cadenas largas a los monómeros correspondientes reciben el nombre de hidrólisis y es llevado a cabo por la acción de enzimas extracelulares que son excretadas por bacterias fermentadoras (Mata-Alvarez, 2003).

Los productos de la hidrólisis que atraviesan la pared celular de los microorganismos son empleados en las siguientes etapas del proceso. Los microorganismos secretan enzimas hidrolíticas en los alrededores de la partícula y posteriormente se benefician con el sustrato que logra disolverse (Shah *et al.*, 2014). Las enzimas que intervienen dependen del sustrato a degradar.

De acuerdo con Shah *et al.* (2014), la tasa de hidrólisis depende de:

- La naturaleza, tamaño y concentración del sustrato;
- Los microorganismos presentes, la producción y difusión de las enzimas y su adsorción al sustrato;
- La temperatura y el pH.

Se ha documentado que la hidrólisis de la materia orgánica compleja a compuestos solubles es la etapa limitante de los procesos anaerobios para los desechos con un alto contenido sólidos (Khalid *et al.*, 2011, Schnürer y Jarvis, 2010).

Acidogénesis. Es la segunda etapa, también conocida como fermentación. Los productos obtenidos en la etapa de hidrólisis (monómeros y dímeros) son convertidos principalmente por bacterias anaerobias y facultativas, a ácido acético y otros ácidos grasos volátiles (AGV), ácidos grasos de cadena larga (AGCL), alcoholes, aldehídos, hidrógeno y dióxido de carbono (Shah *et al.*, 2014). En esta etapa se producen principalmente ácidos grasos de más de dos átomos de carbono como los ácidos propiónico o butírico (Khanal, 2008). Las proporciones de los diferentes subproductos dependen de las especies de microorganismos y de las condiciones ambientales dentro del reactor.

Acetogénesis. Los sustratos para las arqueas son el ácido acético, metanol y el CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub>, por lo que es necesaria una transformación de los AGCL y AGV diferente al ácido acético que se producen durante la acidogénesis. En esta etapa los microorganismos facultativos transforman los productos finales de la etapa anterior en acetato, hidrógeno y CO<sub>2</sub>, aportando aproximadamente el 54% del hidrógeno que se utilizará en la formación de metano (Deublein y Steinhauser, 2008).

La etapa de acetogénesis es de vital importancia debido a que los productos finales son los utilizados en la producción de biogás; sin embargo, deben estar en determinadas cantidades, ya que, en caso de existir una elevada concentración de hidrógeno, se inhibe la producción de metano, incrementando la concentración de AGV (como el ácido propiónico y butírico) dentro del reactor, acidificándolo y disminuyendo el pH. El nivel óptimo de presión parcial para que las reacciones de acetogénesis sean termodinámicamente favorables (el intercambio neto de energía,  $\Delta G$ , debe ser negativo) está ubicado dentro del rango de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  atm (Mata-Alvarez, 2003).

Metanogénesis. Es la etapa final de la digestión anaerobia, donde se realiza la producción de metano mediante dos grupos diferentes de microorganismos clasificados como arqueas



(Shah *et al.*, 2014). Entre los cuatro grupos microbianos, los metanógenos se cree que tienen la tasa de crecimiento más lenta y son los más sensibles a los cambios de condiciones ambientales, como la temperatura, el pH y las concentraciones de inhibidores. Mata-Alvarez *et al.* (2011) mencionan que la inhibición potencial de la metanogénesis por el amoníaco es un problema bien conocido cuando se digieren desechos con alto contenido de nitrógeno. Por lo tanto, la metanogénesis es comúnmente considerada como un paso limitante en el proceso de DA.

Para la producción de metano existen las siguientes rutas: una es la conversión que hacen las arqueas acetoclásticas metanogénicas o acetotróficas, donde el precursor es el ácido acético y aporta la mayor proporción de metano: el 70% del metano es producido mediante esta ruta metabólica (Khanal, 2008). La metanogénesis hidrogenotrófica emplea  $H_2$  y  $CO_2$ , donde el dióxido de carbono es el aceptor de electrones mientras que el hidrógeno actúa como donador. Esta ruta genera una cantidad menor de metano, el 30% del metano restante (Khanal 2008) y posee un papel importante en el proceso. Las bacterias hidrogenofílicas o consumidoras de hidrógeno evitan la acumulación de éste en el sistema y por ende evitan el incremento de su presión parcial, la cual es una de las causas de inhibición de los microorganismos metanogénicos (Mata-Alvarez, 2003).

## 4.2. Biodegradabilidad de la materia orgánica

*Prueba de potencial bioquímico de metano (PBM).* La biodegradabilidad de una materia prima está indicada por la producción de biogás que se puede determinar como PBM y el porcentaje de sólidos que se eliminan en la digestión anaerobia. El objetivo de una prueba de PBM es medir el metano máximo producido por un sustrato específico. Asimismo, a través de esta prueba se analiza la calidad de la materia orgánica y del inóculo utilizados en la digestión anaerobia (Schievano *et al.*, 2010); también proporciona elementos que permiten determinar el tiempo de retención requerido para llevar a cabo la digestión completa en un reactor de digestión anaerobia.

El PBM de los residuos destinados al proceso de digestión anaerobia, depende de la composición relativa de cuatro componentes principales; proteínas, grasas, carbohidratos y contenido de fibras (Neves *et al.*, 2008). Por otra parte, una de las variables más importantes en las pruebas de PBM es el tipo de inóculo utilizado, ya que dependiendo de su origen se puede determinar la actividad inicial de los microorganismos usados en la prueba, además de la adaptación al sustrato y los residuos generados del sustrato anaeróbicamente biodegradable (Elbeshbishy *et al.*, 2012).

Existen varios métodos para medir el PBM de los residuos, sin embargo, sus enfoques técnicos varían significativamente entre los métodos publicados (Angelidaki *et al.*, 2009; Raposo *et al.*, 2011).

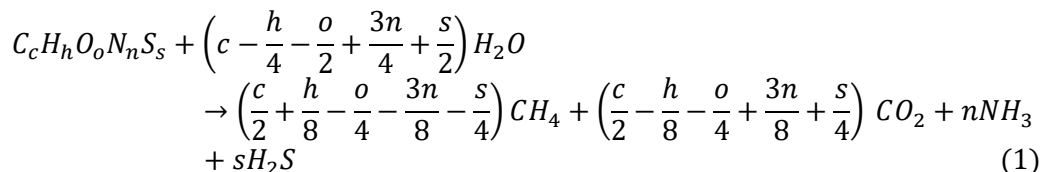
El principio general de la técnica es la incubación de un sustrato como fuente de carbono con una variedad de microorganismos anaerobios, en un medio adecuado (agua y minerales) a pH neutro y a un rango específico de temperatura. La estandarización del método no se ha logrado por las numerosas variables que se involucran en la prueba, lo cual limita la comparación de los resultados (Campuzano y González- Martínez, 2015).

*Biodegradabilidad teórica basada en composición elemental.* El análisis de composición elemental proporciona información sobre el potencial de metano teórico de un desecho. La ecuación de Buswell y Muller (1952), ecuación 1, asume la producción de metano a partir



de la degradación completa de un cierto residuo, donde  $C_cH_hO_oN_nS_s$  presenta la fórmula química del compuesto orgánico biodegradable sometido al proceso de degradación anaerobia (descartando el P). La producción de metano considerado es el máximo estequiométrico (Hidalgo y Martín-Marroquín, 2015).

Para un compuesto  $C_cH_hO_oN_nS_s$  el potencial teórico de metano (en condiciones estándar de temperatura y presión) es:



$$B_{o,th} = \frac{\left( \frac{c}{2} + \frac{h}{8} - \frac{o}{4} - \frac{3n}{8} - \frac{s}{4} \right) \cdot 22.4}{12c + h + 16o + 14n + 32s} \Big| = \Big| \frac{L CH_4}{g SV}$$

La ecuación de Buswell y Muller solo da una indicación aproximada de la cantidad de biogás producido a partir de un residuo, pero es un buen comienzo cuando se analizan sustratos potenciales para un bioreactor. Dado que esta técnica toma en cuenta la composición elemental y no diferencia entre materia biodegradable y no biodegradable, así como la complejidad del sustrato, arrojará un valor de potencial bioquímico de metano mayor que el real, por lo que es usado comúnmente como referencia y complemento con otras pruebas de biodegradabilidad (Lesteur *et al.*, 2010).

Biodegradabilidad teórica basada en composición orgánica. El potencial bioquímico de metano teórico (TPBM) se ha utilizado en varios estudios para evaluar el potencial de metano. Triolo *et al.* (2011) calcularon el TPBM realizando ligeras modificaciones al método utilizado por Møller *et al.* (2004) donde incluyeron la lignina con la siguiente fórmula empírica:  $C_{10}H_{13}O_3$ . El potencial de metano teórico de la lignina lo calcularon usando la ecuación proporcionada por Symons y Buswell (1933) y obtuvieron una producción teórica de 727.1 NLCH<sub>4</sub>/kg<sub>lignina</sub>.

En base a la composición de los componentes presentada por Møller *et al.* (2004) y la lignina. Propusieron que el TPBM se calcule de la siguiente forma:

$$TPBM = (C_{57}H_{104}O_6 \cdot 1014 + C_5H_7O_2N \cdot 496 + C_6H_{10}O_5 \cdot 415 + C_{10}H_{13}O_3 \cdot 727) \cdot 0.001 \quad (2)$$

En la ecuación 2 se incluyen lípidos ( $C_{57}H_{104}O_6$ ), proteínas ( $C_5H_7O_2N$ ), carbohidratos ( $C_6H_{10}O_5$ ) y lignina ( $C_{10}H_{13}O_3$ ) en g/kg<sub>SV</sub> (Triolo *et al.*, 2011). El TPBM no se utiliza como un indicador del potencial de producción de metano, pero sí como un criterio para evaluar la biodegradabilidad del sustrato mediante la relación que se establece en la ecuación 3 (Triolo *et al.*, 2012).

$$Biodegradabilidad\ anaerobia = \frac{PBM}{TPBM} \cdot 100\% \quad (3)$$



### 4.3. Composición de la FORSU

En la Tabla 4.1 se muestra la composición de los residuos identificados en diferentes países como son: Reino Unido, Finlandia, Portugal, Italia, Japón, Dinamarca, México y Brasil y el rendimiento de metano obtenido al finalizar la digestión anaerobia correspondiente.

#### Reino Unido, Finlandia, Italia y Portugal

El proyecto VALORGAS (2010) categorizó la FORSU de cuatro países diferentes de la Unión Europea (Reino Unido, Finlandia, Italia y Portugal) con base en diferentes costumbres alimenticias, características geográficas y socioeconómicas. Los resultados indican que la presencia de algunas fracciones está relacionada con las costumbres alimenticias: en Italia la presencia de pastas es notablemente mayor que en los otros países; en Finlandia sobresalen residuos de bolsas de té y café; y en Reino Unido hay una presencia importante de residuos de pan. En general las fracciones que encontraron en mayor proporción fueron las frutas y vegetales seguido de harinas, panes y carne.

#### Japón

Kobayashi *et al.* (2012) utilizaron residuos domésticos de la ciudad de Kioto provenientes de una planta de demostración para digestión anaerobia de FORSU. La separación se realizó con el objetivo de analizar su composición y la producción metano e hidrógeno de cada fracción. Los residuos fueron divididos en las siguientes categorías: restos de cocina de origen animal, restos de cocina de origen vegetal, residuos no clasificables de cocina, papel usado en cocina, residuos de cereales, bolsas de café y té, periódico usado para envolver restos de comida, restos de papel y envolturas de comida, residuos de cocina de origen animal enteros, residuos de cocina de origen vegetal enteros, papel de oficina usado y residuos de poda fresca.

#### Italia

Alibardi y Cossu (2015) realizaron muestreos durante los meses de febrero, mayo, julio, octubre y noviembre en la ciudad de Padua, Italia y analizaron la variación temporal en la composición de FORSU muestreada de una planta de DA. Las fracciones identificadas fueron: carne-pescado-queso, frutas, vegetales, pasta-pan, no clasificable y material de rechazo. En 2016 realizaron una caracterización de cuatro de las fracciones identificadas en el 2012 con sustratos reproducibles que simulaban desechos orgánicos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos del contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos de los residuos orgánicos en el rendimiento de hidrógeno y producción de ácidos grasos volátiles.

#### Dinamarca

Naroznova *et al.* (2016) caracterizaron residuos orgánicos separados en fuente de generación en la ciudad de Halsnæs, Dinamarca, con la finalidad de conocer el potencial bioquímico de metano de las fracciones que integran estos residuos orgánicos. Basándose en la normatividad danesa se crearon dos categorías generales, materiales separados correctamente: restos de comida de origen animal, restos de comida de origen vegetal, papel de cocina usado, residuos de poda y vegetación, residuos de cartón (fibras moldeables) y residuos separados erróneamente: residuos originados por mascotas (excretas y paja usada), papel no reciclable y cartulina usada en empaques de comida. A partir de esta clasificación también pudieron identificar desechos de alimentos y residuos ricos en fibra.



**Tabla 4.1.** Caracterización bromatológica y PBM de FORSU y fracciones de acuerdo con diferentes autores

| País      | Fracción                   | Proteína %SV    | Lípidos %SV     | Compuestos lignocelulósicos %SV |                |         | Carbohidratos degradables, %SV | Carbohidratos totales, %SV | PBM <sup>d</sup> NL/kg <sub>SV</sub> | Referencia                          |
|-----------|----------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|----------------|---------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|           |                            |                 |                 | Celulosa                        | Hemicelulosa   | Lignina |                                |                            |                                      |                                     |
| Japón     | Origen animal              | 54.4            | 35.7            | 3.9                             | -              | -       | 6.0                            | 9.9                        | 500 <sup>a</sup>                     | Kobayashi <i>et al.</i> , 2012      |
|           | Vegetales                  | 21.6            | 19.4            | 21.6                            | 9.0            | -       | 28.4                           | 59.0                       | 400 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Otros residuos de cocina   | 23.1            | 19.2            | 7.5                             | 2.7            | -       | 47.5                           | 57.6                       | 410 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Papeles varios             | 7.3             | 20.8            | 59.9                            | 4.1            | -       | 7.9                            | 71.9                       | 380 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Cereales                   | 10.4            | 3.4             | -                               | -              | -       | 86.3                           | 86.3                       | 380 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Bolsas de té y café        | 21.9            | 11.3            | 20.5                            | 17.7           | -       | 28.6                           | 66.8                       | 300 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Periódico                  | 5.7             | 7.1             | 66.4                            | 5.1            | -       | 15.8                           | 87.2                       | 100 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Papel para envolver        | 2.1             | 2.1             | 91                              | 5.0            | -       | 0.0                            | 95.9                       | 280 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Origen animal sin consumir | 59.8            | 27.2            | 1.6                             | -              | -       | 11.4                           | 13.0                       | 590 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Vegetales sin consumir     | 19.4            | 11.1            | 19.4                            | -              | -       | 50.0                           | 69.4                       | 520 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Papel usado                | 2               | 7.4             | 75.5                            | 6.4            | -       | 8.6                            | 90.5                       | 420 <sup>a</sup>                     |                                     |
|           | Vegetación                 | 30.8            | 15.4            | 45.7                            | 13.6           | -       | 0.0                            | 53.8                       | 340 <sup>a</sup>                     |                                     |
| Dinamarca | Origen animal              | 12              | 25              | 2                               | 7              | 2       | 52                             | -                          | 572                                  | Naroznova <i>et al.</i> , 2016      |
|           | Vegetales                  | 5               | 14              | 12                              | 10             | 5       | 53                             | -                          | 425                                  |                                     |
|           | Toalla de cocina           | 2               | 10              | 60                              | 5              | 2       | 21                             | -                          | 419                                  |                                     |
|           | Vegetación                 | 5               | 7               | 22                              | 10             | 13      | 43                             | -                          | 237                                  |                                     |
|           | Fibras moldeables          | 1               | 2               | 62                              | 5              | 11      | 19                             | -                          | 202                                  |                                     |
|           | Paja para animales         | 3               | 2               | 42                              | 16             | 20      | 18                             | -                          | 110                                  |                                     |
|           | Papel sucio                | 1               | 12              | 61                              | 3              | 3       | 19                             | -                          | 372                                  |                                     |
|           | Cartón sucio               | 1               | 3               | 65                              | 7              | 7       | 17                             | -                          | 271                                  |                                     |
| Italia    | Carne, pescado y queso     | 52 <sup>b</sup> | 33 <sup>b</sup> | <1 <sup>b</sup>                 | 2 <sup>b</sup> | -       | 10 <sup>b</sup>                | 12 <sup>b</sup>            | -                                    | Alibardi y Cossu, 2016              |
|           | Frutas                     | 3 <sup>b</sup>  | <1 <sup>b</sup> | 3 <sup>b</sup>                  | 2 <sup>b</sup> | -       | 89 <sup>b</sup>                | 94 <sup>b</sup>            | -                                    |                                     |
|           | Vegetales                  | 11 <sup>b</sup> | 4 <sup>b</sup>  | 3 <sup>b</sup>                  | 3 <sup>b</sup> | -       | 66 <sup>b</sup>                | 72 <sup>b</sup>            | -                                    |                                     |
|           | Pan y pasta                | 13 <sup>b</sup> | 4 <sup>b</sup>  | <1 <sup>b</sup>                 | 2 <sup>b</sup> | -       | 80 <sup>b</sup>                | 82 <sup>b</sup>            | -                                    |                                     |
| Brasil    | Frutas y vegetales         | 15.9            | 4.5             | 17.1                            | 9.4            | 6.4     | 46.7                           | -                          | 377                                  | Edwiges <i>et al.</i> , 2017        |
| México    | FORSU                      | 15.2            | 17.5            | 21.1                            | 5.1            | 13.5    | -                              | 52.9                       | 545                                  | Campuzano y González-Martínez, 2016 |
| México    | Frutas                     | 11.3            | 23.5            | 24.9                            | 1              | 4.5     | -                              | 63.8                       | 401                                  | González <i>et al.</i> , 2016       |
|           | Vegetales                  | 17.2            | 36.4            | 17.6                            | 3.6            | 10.6    | -                              | 39.5                       | 345                                  |                                     |
|           | MONC <sup>c</sup>          | 25.4            | 29.3            | 18.6                            | 6.6            | 16.3    | matriz -                       | 45.1                       | 298                                  |                                     |
|           | Origen animal              | 64.4            | 33.2            | -                               | -              | -       | -                              | 4.2                        | 312                                  |                                     |
|           | Harinas                    | 17.5            | 19.1            | -                               | -              | -       | -                              | 82.7                       | 291                                  |                                     |
|           | Hojas secas                | 16.5            | 29.3            | 22.4                            | 7.6            | 13.2    | -                              | 70.5                       | 178                                  |                                     |
|           | Poda fresca                | 22.4            | 30.7            | 14.8                            | 9.9            | 24.8    | -                              | 24.9                       | 409                                  |                                     |
|           | Papel                      | 10.6            | 21.4            | 54.2                            | 19.8           | 19.2    | -                              | 56.1                       | 446                                  |                                     |
| FORSU     | 16.6                       | 25.1            | 20.8            | 15.6                            | 15.6           | -       | 52.1                           | 348                        |                                      |                                     |

<sup>a</sup> Como los autores no proporcionaron datos de temperatura y presión, se supone que estos valores están bajo temperatura y presión estándar de 273.15 °K y 1 atm.

<sup>b</sup> En esta referencia, la unidad es % TS.

<sup>c</sup> MONC: material orgánico no clasificable.

<sup>d</sup> NL: litros normalizados de metano (calculados para condiciones estándares de 0°C y 1 atm).

(-) indica que no hay datos disponibles.



### México

Campuzano y González-Martínez (2016) y González *et al.* (2016) tomaron muestras de FORSU de una estación de transferencia en la Ciudad de México. En el primer trabajo utilizaron solo FORSU. Mientras que González *et al.* (2016) hizo una identificación visual, separación, caracterización y pruebas de potencial de metano de las fracciones de la FORSU. A partir de los desechos orgánicos identificaron 8 fracciones: frutas, vegetales, materia orgánica no clasificable, residuos de origen animal, harinas, poda fresca, hojarasca y papel. Orgánicos no clasificados (37%) y residuos de frutas (27%) representaron el peso relativo más alto dentro de las fracciones separadas de la FORSU de la Ciudad de México, mientras que el papel usado (2%) y el desperdicio de pan (3%) tuvieron la contribución más baja en peso neto. El desperdicio de papel presentó la mayor producción de metano y las hojas secas la más baja, pero su contribución general es diferente si se considera su peso relativo en la FORSU.

### Brasil

Edwiges *et al.* (2017) estudiaron la influencia de la composición química sobre el potencial de metano (PBM) de 12 lotes diferentes de residuos de frutas y vegetales con diferentes composiciones, recolectados durante un año (2014-2015). Encontraron que el PBM se correlacionó más fuertemente con el contenido de lípidos y los altos valores de calorías mientras que la lignina se correlacionó negativamente con la producción de metano. Realizaron una regresión lineal múltiple para desarrollar modelos estadísticos para predecir más rápidamente el potencial de metano. La mejor predicción de PBM la obtuvieron utilizando el modelo estadístico que incluía lípidos, proteínas, celulosa, lignina y el poder calorífico.

En cuanto a los valores presentados en la Tabla 4.1 se puede observar que el mayor contenido de proteínas lo obtuvieron los residuos de origen animal sin consumir presentados en el trabajo de Kobayashi *et al.* (2012) con 59.8%SV mientras que el menor valor se obtuvo en este mismo trabajo de los residuos de papel y cartón con 1%SV.

El trabajo de González *et al.* (2016) presenta el mayor contenido de lípidos en los residuos de vegetales con 36.4%SV mientras que el valor más bajo se observa en los residuos de Italia en la fracción de frutas que presenta Alibardi y Cossu (2016) con <1%ST.

El mayor contenido de carbohidratos degradables se presenta en la fracción de frutas de los residuos obtenidos por Alibardi y Cossu (2016) con 89%ST y el menor lo tienen los residuos de Japón en la fracción de vegetales y papel para envolver con 0%SV (Kobayashi *et al.*, 2012). Para los carbohidratos totales el mayor contenido se obtuvo a partir de la fracción de papel para envolver con 95.9%SV y el menor a partir de los residuos de origen animal con 4.2%SV (González *et al.*, 2016).

Siguiendo con los carbohidratos, el mayor contenido de celulosa se presenta en la fracción de papel usado con 75.5%SV en el trabajo de Kobayashi *et al.* (2012) y el valor más bajo lo tienen los residuos de Italia en las fracciones de pan y pasta, carne, pescado y queso con <1%ST. En hemicelulosa se puede ver que el valor más alto lo consiguieron los residuos de papel en el trabajo de González *et al.* (2016) con 19.8%SV. Mientras que el menor contenido lo presentan los residuos de frutas en este mismo trabajo con 1%SV.

El mayor contenido de carbohidratos degradables se presenta en la fracción de frutas de los residuos de Italia obtenidos por Alibardi y Cossu (2016) con 89%ST y el menor lo tienen los residuos de Japón en la fracción de vegetales y papel para envolver con 0%SV (Kobayashi *et al.*, 2012). Para los carbohidratos totales el mayor contenido se obtuvo a partir de la fracción





---

de papel para envolver con 95.9%SV y el menor a partir de los residuos de origen animal con 4.2%SV (González *et al.*, 2016).

El menor valor reportado de lignina se tiene en los residuos de origen animal y toalla de cocina con 2%SV mientras que el mayor contenido se encuentra en los residuos de poda fresca que presenta González *et al.* (2016) con 24.8%SV.

Kobayashi *et al.* (2012) presenta la mayor producción de metano en la fracción de residuos de origen animal con 590 NL/kg<sub>SV</sub> y el menor se encuentra en este mismo trabajo en la fracción de periódico con 100 NL/kg<sub>SV</sub>, seguido de la fracción de paja de animales con 110 NL/kg<sub>SV</sub> (Naroznova *et al.*, 2016).



## 5. BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

La biomasa lignocelulósica, tal como residuos de cultivos, pastizales, paja de trigo, cáscara de frutos, residuos de jardín y desechos forestales ofrece un abundante recurso de carbono orgánico para la producción de bioenergía (Xu *et al*, 2014). Sus componentes orgánicos, como celulosa, hemicelulosa, proteínas y lípidos, pueden ser metabolizados por los microorganismos produciendo varios tipos de biocombustibles como etanol, butanol y biogás (Zheng *et al.*, 2014). La bioenergía producida a partir de biomasa lignocelulósica se considera renovable y localmente disponible (Xu *et al*, 2014).

La biomasa lignocelulósica es una materia prima abundante y renovable, con una estimación de una producción mundial anual de entre 10 y 50 mil millones de toneladas como materia seca (Galbe y Zacchi, 2002), incluyendo la paja de cereales, paja de trigo, cáscara de arroz, mazorcas de maíz, bagazo de caña de azúcar, cáscaras de frutos secos, residuos de cosecha forestal y residuos de proceso de madera.

Las lignocelulosas presentan una estructura compleja compuesta por una combinación variada de polímeros agrupados como celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, hemicelulosa ( $C_5H_8O_4$ )<sub>m</sub> y lignina [ $C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0,9-1,7}$ ]<sub>n</sub>, (Balat, 2011), presentes en la pared celular de las plantas y que constituyen alrededor del 80-90% de la biomasa; el resto la constituyen otros materiales orgánicos y minerales inorgánicos. A manera de ejemplo en la Tabla 4.1, es posible ver diversos tipos de residuos identificados en diferentes países y su composición de lignocelulosas.

La naturaleza recalcitrante de la pared celular de los materiales lignocelulósicos representa el mayor desafío en ese campo. Su mayor componente es la celulosa, compuesta por largas cadenas de glucosa unidas por enlaces  $\beta$  (1-4) que, a su vez, se agrupan en estructuras superiores de gran cristalinidad. Esta estructura cristalina es la que dificulta la hidrólisis de la celulosa para la obtención de azúcares fermentables. La celulosa es protegida por una matriz formada por lignina que le confiere resistencia al ataque de microorganismos, enzimas y agentes químicos.

### 5.1. Componentes de la biomasa lignocelulósica

Celulosa. La celulosa es un homopolisacárido con fórmula ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>. Es el componente principal de las paredes celulares de lignocelulosa (Zheng *et al.*, 2014) y el compuesto orgánico más común en la tierra. La mayoría de las plantas están compuestas por un 38-50% de celulosa (Paul y Dutta, 2018) con una producción anual de más de 50 mil millones de toneladas (Araujo *et al.*, 2008).



La celulosa es un polímero polisacárido lineal que se compone de dos moléculas de glucosa unidas y esterificadas por enlaces  $\beta$ -1,4 glucosídicos que se unen para formar unidades de repetición de celobiosa (Pecoraro *et al.*, 2008); se estructuran en largas cadenas lineales, típicamente de alrededor de 36 cadenas de celulosa unidas por puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals intramoleculares, lo que resulta en microfibrillas con alta resistencia a la tracción (Zheng, 2014).

Las moléculas de celulosa tienen diferentes orientaciones a lo largo de su estructura, lo que lleva a diferentes niveles de cristalinidad. La celulosa consta de dos regiones: amorfa (baja cristalinidad) susceptible a la degradación enzimática y regiones cristalinas (alta cristalinidad) resistente a la hidrólisis. La cristalinidad de la celulosa se puede caracterizar por el índice de cristalinidad. Entre más alto el índice de cristalinidad más difícil se convierte la biodegradación de la celulosa. Las microfibrillas de celulosa también son unidas entre sí por hemicelulosa y/o pectina y cubiertas por la lignina (Tahezadeh y Jeihanipour, 2012 y Zheng *et al.*, 2014).

En general las verduras, frutas, leguminosas, frutos secos y los cereales aportan cantidades importantes de celulosa. Una porción mayoritaria del salvado de trigo es celulosa (Ruíz, 2017). La madera dura (proveniente de un árbol de angiospermas, con semillas encerradas) contiene mayores cantidades de celulosa que la madera blanda (madera de un árbol de gimnospermas, con semillas sin revestimiento). Las fibras de algodón son un simple ejemplo de celulosa.

La celulosa es el polisacárido más abundante en los residuos orgánicos complejos. Una fracción considerable de la celulosa de los residuos orgánicos domésticos está incorporada en un complejo lignocelulósico con la lignina (Paul y Dutta, 2018).

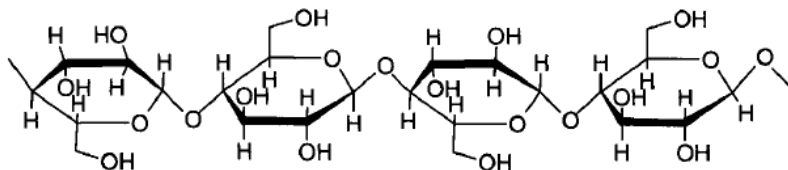


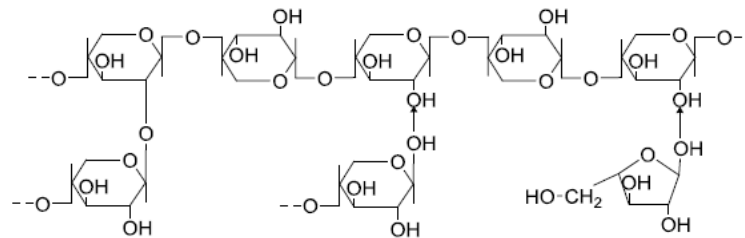
Figura 5.1. Estructura de la celulosa (Tahezadeh y Jeihanipour, 2012)

**Hemicelulosa.** La hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidrato con diferentes tipos de polímeros. Es el segundo polisacárido más común en la naturaleza (Paul y Dutta, 2018). El término hemicelulosa se utiliza para definir los polisacáridos que normalmente se asocian con la celulosa en las paredes celulares (Rogalinski *et al.*, 2008). Se producen en estrecha asociación con la celulosa y la lignina y contribuyen a la rigidez de las paredes celulares de las plantas ya que cadenas cortas y ramificadas de hemicelulosas ayudan a construir una red con microfibrillas de celulosa e interactuar con la lignina, lo que hace que la matriz celulosa hemicelulosa y lignina sea extremadamente rígida (Zheng *et al.*, 2014).

Las hemicelulosas constituyen alrededor del 23-32% de la masa total de las plantas. Tienen una composición heterogénea formada por diferentes unidades estructurales de azúcares neutros (Spiridon y Popa, 2008). Estos azúcares pueden ser carbohidratos de cinco carbonos (xilosa y arabinosa) y carbohidratos de seis carbonos (galactosa, glucosa y manosa y/o ramnosa). A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa se compone de combinaciones de pentosas y/o hexosas y glucosa (Paul y Dutta, 2018). Algunas hemicelulosas contienen adicionalmente ácidos como el ácido glucurónico y ácido galacturónico.



Entre las características de la hemicelulosa se encuentran: su alto carácter hidrofílico, contienen cadenas considerablemente ramificadas, naturaleza altamente amorfa y un grado de polimerización entre 100 y 200. El componente hemicelulósico principal de algunos materiales vegetales como maderas duras son los xilanos y en maderas suaves el glucomanano. Este polímero es de peso molecular más bajo que la celulosa y contiene ramificaciones con cadenas laterales cortas de azúcares diferentes fácilmente hidrolizables (Hendriks y Zeeman, 2009).



**Figura 5.2.** Estructura química de la hemicelulosa (Ruíz, 2016)

El nombre hemicelulosa describe a un grupo heterogéneo de estructuras químicas que están presentes en alimentos vegetales en forma soluble e insoluble en agua. Aproximadamente un tercio de la fibra dietética en las verduras, frutas, legumbres y nueces se compone de hemicelulosas (Ruíz, 2016).

La fuente de hemicelulosa determina su naturaleza química y en general el xilano es el componente dominante de la hemicelulosa de plantas agrícolas tales como pastos, paja y maderas duras (Kambo, 2014).

Lignina. Después de la celulosa, la lignina es el segundo compuesto orgánico más abundante en la naturaleza. Constituye alrededor del 10-25% de la masa total de las plantas (Paul y Dutta, 2018). No es un polisacárido, pero está asociada con la celulosa y la hemicelulosa en la composición del material lignocelulósico. Es un polímero natural complejo en relación con su estructura y heterogeneidad (Ruiz, 2016).

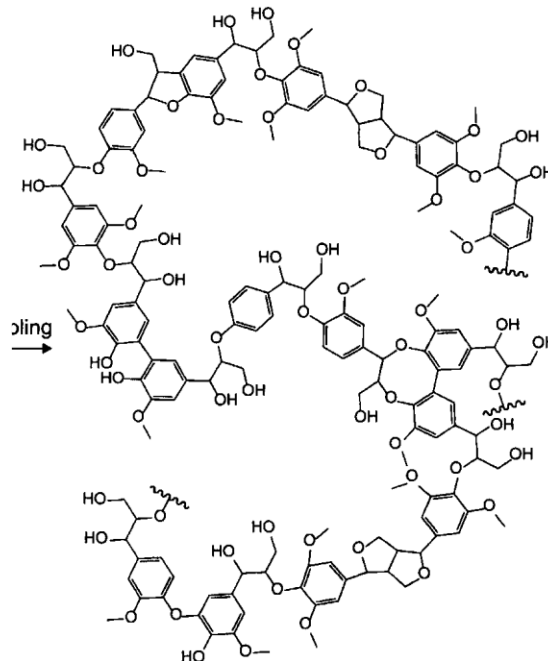
Las ligninas son macromoléculas con elevado peso molecular que resultan de la unión de alcoholes fenil-propílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, de polímero amorfo, altamente ramificada. La lignina desempeña el papel de cemento para la reticulación entre celulosa y hemicelulosa para formar una estructura tridimensional rígida de la pared celular. Es insoluble en agua, ópticamente inerte (Zheng *et al.*, 2014) y puede ser clasificada como un polifenol, que está constituido por un enlace irregular de diversas unidades de fenilpropano que pueden contener grupos hidroxilo y metoxilo como sustituyentes en el grupo fenilo. Los enlaces éter dominan la unión entre las unidades de la lignina que cuenta con un gran número de interconexiones. La fuerza de adhesión entre las fibras de celulosa y lignina aumenta por la existencia de enlaces covalentes entre las cadenas de lignina y componentes de la celulosa y la hemicelulosa (Flores, 2014).

Suns (2010) define la estructura de la lignina de acuerdo con las siguientes características:

- Son polímeros vegetales construidos a base de unidades de fenilpropanoides.



- Presentan la mayor parte de los grupos metoxilo totales contenidos en la madera.
- Son resistentes a la hidrólisis ácida, fácilmente oxidables, solubles en bisulfito o álcalis caliente, y fácilmente condensables con fenoles o tioles.
- Cuando se hace reaccionar con nitrobenzeno, en una solución alcalina caliente, las ligninas producen principalmente vainillina, siringaldehído y p-hidroxibenzaldehído, en función del origen de las ligninas.
- Cuando se colocan a ebullición en una solución etanólica de ácido clorhídrico, las ligninas forman monómeros del tipo “cetonas de Hibbert” (mezcla de cetonas aromáticas resultantes de la ruptura de los principales enlaces éter ( $\beta$ -O-4) entre unidades de lignina).



**Figura 5.3.** Estructura de lignina (Taherzadeh y Jeihanipour, 2012)

En general, la madera blanda contiene más lignina que la madera dura y la mayoría residuos agrícolas, por lo que la madera blanda es generalmente la más recalcitrante al pretratamiento y la bioconversión.

## 5.2. Hidrólisis de compuestos lignocelulósicos

De los cuatro grupos microbianos involucrados en la digestión anaerobia: bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, se sabe que estas últimas tienen la tasa de crecimiento más lenta y son los más sensibles a los cambios de las condiciones ambientales, como la temperatura, el pH y las concentraciones de inhibidores. Por lo tanto, la metanogénesis se considera comúnmente como una etapa limitante en el proceso de DA.

Sin embargo, para la degradación de materiales sólidos recalcitrantes, como la biomasa lignocelulósica, se cree que la hidrólisis es la etapa limitante. El encapsulamiento de celulosa y hemicelulosa en lignina puede restringir considerablemente la degradación anaerobia debido a la accesibilidad limitada de los sustratos por las enzimas y/o la complejidad de los compuestos que necesitan hidrolizarse.



La ruptura de la estructura compleja es esencial para el ataque enzimático y la bioconversión eficiente en procesos como la hidrólisis, la fermentación y la metanogénesis. Los pretratamientos o codigestión con otras materias primas (Yang, 2015) para mejorar la hidrólisis pueden usarse para solubilizar materia orgánica antes de la DA con el fin de mejorar el proceso general en términos de tasas más rápidas y grado de degradación de FORSU aumentando así la producción de metano (Pecorini *et al.*, 2016).

Los componentes de carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) son fermentables después de la hidrólisis, lo que hace que la biomasa lignocelulósica sea una materia prima adecuada para la producción de bioenergía. Las características inherentes de la biomasa lignocelulósica nativa, como las propiedades estructurales y químicas, la hacen resistente a la biodegradación por enzimas y microbios.

Los microorganismos aerobios y anaerobios usan diferentes estrategias para la degradación de sustratos celulósicos. Los aerobios comúnmente producen celulasas en altas concentraciones que actúan de forma sinérgica para hidrolizar la celulosa, mientras que los anaerobios desarrollan un mecanismo más conservador de la energía para la degradación extracelular de sustratos poliméricos, incluida la celulosa recalcitrante en las paredes celulares de las plantas. Estos microorganismos producen un complejo multienzimático altamente eficiente y único, llamado celulosoma, especializado en la degradación de la celulosa (Taherzadeh y Jeihanipour, 2012).

En el caso de las hemicelulosas, las propiedades amorfas y ramificadas hacen que sean altamente susceptibles a la hidrólisis biológica, térmica y química de sus compuestos monoméricos. El contenido de humedad, pH y temperatura son parámetros críticos en la hidrólisis termoquímica de la hemicelulosa.

### **5.3. Recalcitrancia de lignocelulosas**

De acuerdo con Neilson *et al.* (1985), las sustancias que persisten en el medio ambiente durante largos períodos de tiempo en todos los entornos son calificadas como recalcitrantes. Las paredes celulares de las plantas han evolucionado para ser difíciles de invadir, permitiéndoles resistir el ataque de patógenos (DeMartini *et al.* 2013). En estas paredes celulares, las microfibrillas celulósicas están rodeadas por una matriz de polímeros, como hemicelulosas, pectinas y lignina, las cuales son sin duda la razón principal de la recalcitrancia de los materiales lignocelulósicos. Debido a que presentan resistencia a la deconstrucción a azúcares monoméricos (Taherzadeh y Jeihanipour, 2012). McCann y Carpita (2015) señalan que a escala nanométrica se ha sugerido que la microfibrilla de celulosa es recalcitrante debido a su naturaleza cristalina.

La lignina es uno de los principales contribuyentes a la recalcitrancia de la biomasa y una de las características primarias del sustrato que afecta la conversión enzimática de la biomasa celulosa. Debido a su naturaleza protectora e hidrófoba, la lignina retarda el acceso de la celulosa a enzimas y ataques microbianos, conduciendo a bajos niveles de degradación de celulosa y hemicelulosa (Zheng *et al.*, 2014).

Zheng *et al.* (2014) señalan a la lignina como una barrera importante para la utilización de biomasa lignocelulósica en procesos de bioconversión, debido a que las propiedades que tiene la lignina la convierten en el componente más recalcitrante de la pared celular de la planta, y



---

cuanto mayor es el contenido de lignina, mayor es la resistencia de la biomasa a la degradación química y biológica.

El grado de recalcitrancia de los polisacáridos de la pared celular a la despolimerización por enzimas u otros reactivos hidrolíticos depende de la accesibilidad del sustrato por las enzimas. Por lo tanto, hay factores principales que afectan la accesibilidad de los polisacáridos. El primero es el área superficial de la pared expuesta al agente hidrolítico, las diferentes edades de las plantas, la organización de los polisacáridos en las paredes celulares y el contenido de lignina. En general, las paredes no lignificadas son mucho más degradables que las paredes lignificadas (Taherzadeh y Jeihanipour, 2012).

De acuerdo con Hu y Ragauskas (2012), la biomasa lignocelulósica puede funcionar como materia prima de la producción de biogás. Sin embargo, la estructura compleja y el contenido de lignina de la biomasa lignocelulósica crean recalcitrancia en la digestión anaerobia por lo que es necesario un proceso de pretratamiento para interrumpir la recalcitrancia natural de escudos de carbohidrato y lignina que perjudican la accesibilidad de enzimas y microbios a celulosa y hemicelulosa (Zheng *et al.*, 2014). El pretratamiento puede disminuir la cristalinidad de celulosa, aumentar el área de superficie accesible y reducir el contenido de lignina, dependiendo del modo de funcionamiento de los métodos de pretratamiento.

Por último, refiriéndose a la FORSU, Buenrostro-Delgado *et al.* (2015) mencionan que la celulosa, hemicelulosa y lignina determinan la biodegradabilidad de los RSU ya que, por ser polímeros recalcitrantes, inciden en el tiempo requerido para la biodegradación de la FORSU y por ende en el tiempo de estabilización de los sitios de confinamiento y en la generación de biogás.



## 6. METODOLOGÍA

Actualmente, científicos se han enfocado en el uso de biomasa lignocelulósica para producir biocombustible y tienen que enfrentarse a la recalcitrancia de la biomasa para lograr una producción con alto rendimiento, ya que se considera un obstáculo importante en el desarrollo de un proceso económicamente viable para convertir la biomasa en combustible. Entendiéndose como recalcitrancia a la resistencia natural que presenta la pared celular a la degradación microbiana y/o enzimática, esta pared celular está formada principalmente de una biomasa lignocelulósica compuesta de hemicelulosa, celulosa y lignina.

Parte de la materia orgánica que compone la FORSU es recalcitrante, por lo que la metodología propuesta busca conocer la composición, el aporte y comportamiento de las diferentes fracciones que integran la FORSU, teniendo así sustratos reales con los cuales estudiar la influencia que presentan los compuestos lignocelulósicos sobre la producción de biogás y determinar sustratos con potencial para ser usados en la producción de metano como energía alterna.

El desarrollo de la metodología incluyó cuatro etapas principales (Figura 6.1): la primera etapa corresponde a la selección del lugar de muestreo en la Ciudad de México, obtención y almacenamiento de la muestra, así como la identificación visual y separación por fracciones de la FORSU, trituración y molienda de cada sustrato. En la segunda etapa se realizó la caracterización por análisis fisicoquímicos y de composición de la FORSU y de cada una de las fracciones identificadas.

En la tercera etapa se realizaron pruebas de potencial bioquímico de metano y cromatografía de cada sustrato. Por último, en la cuarta etapa se seleccionaron sustratos de referencia de acuerdo con lo encontrado en la FORSU de la Ciudad de México, se prepararon, caracterizaron y realizaron pruebas de potencial bioquímico de metano y cromatografía.

Nota: Durante todo el trabajo experimental se realizó un análisis de resultados y, como etapa final se realizó un análisis para correlacionar la producción de biogás con las características de los sustratos seleccionados.



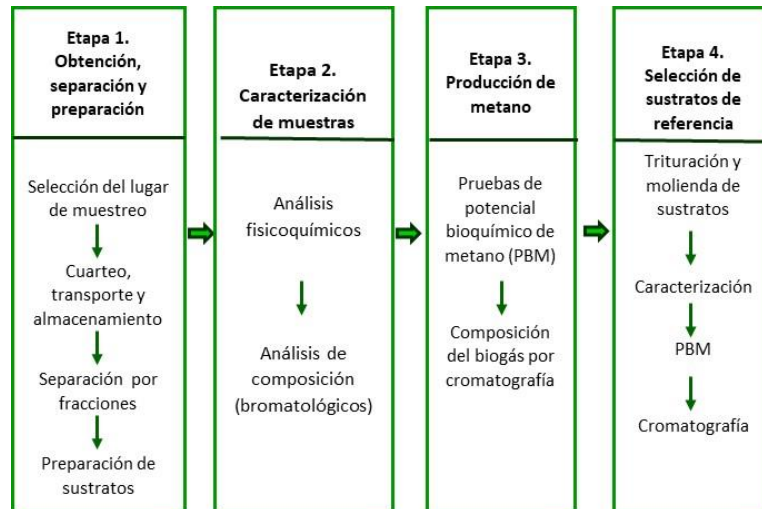


Figura 6.1. Esquema general de la metodología

## 6.1. Obtención, separación y preparación de muestra

La FORSU que se utilizó durante la experimentación se trata de una muestra representativa de los residuos orgánicos generados en la Ciudad de México.

### 6.1.1. Selección del lugar de muestreo

De acuerdo con el último inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México (SEDEMA, 2017), la eficiencia promedio de recolección selectiva de residuos orgánicos durante el año 2016 fue de 33%. Únicamente 5 de las 16 delegaciones tienen una eficiencia de recolección selectiva mayor al 50%, entre ellas Coyoacán. Por lo que, con la finalidad de obtener una muestra representativa de los residuos orgánicos generados en la Ciudad de México, se seleccionó a la estación de transferencia de Coyoacán.

### 6.1.2. Obtención de la muestra de FORSU

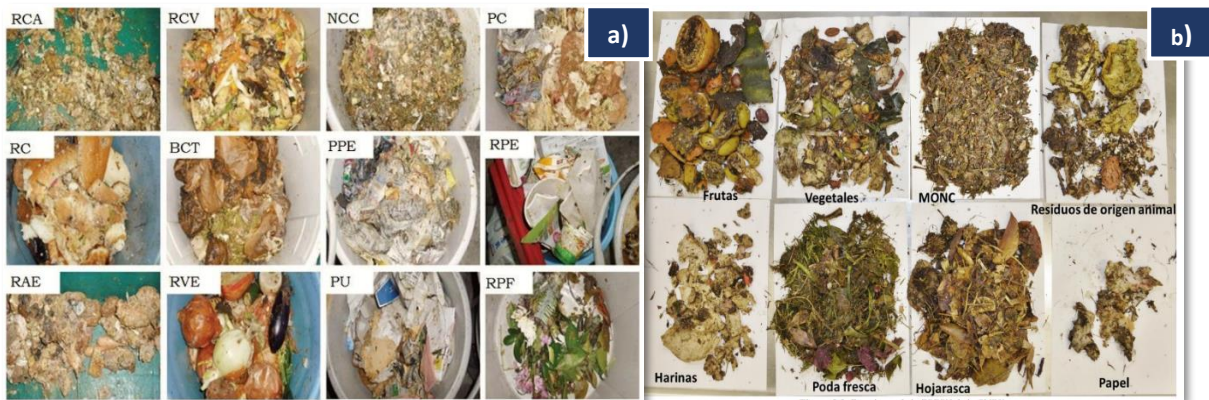
Los días establecidos para recolección de orgánicos corresponden a los días martes, jueves y sábado. La selección de los camiones de los cuales se obtuvieron los residuos fue de manera aleatoria, tomando descargas de residuos de diferentes vehículos y homogenizándolas con palas para luego realizar el método de cuarteo con base en la Norma NMX-AA-015-1985 y la determinación del peso volumétrico *in situ* con base en la Norma NMX-AA-019-1985.

Las bolsas fueron llenadas de forma manual con FORSU, rotuladas y transportadas el mismo día del muestreo a las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental en el edificio 5 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y almacenadas en congeladores a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  para impedir su descomposición.

### 6.1.3. Separación de la FORSU

Las muestras almacenadas se descongelaron a temperatura ambiente e inmediatamente después se realizó una identificación visual de las diferentes fracciones orgánicas, las cuales fueron cuidadosamente separadas y ordenadas manualmente. Tomando como referencia los

4 grupos principales que presenta Kobayashi *et al.* (2012), de acuerdo con su composición de nutrientes: proteínas, grasas, material celulósico y carbohidratos (Figura 6.2a), las 8 fracciones identificadas en el trabajo de Naroznova *et al.* (2016) agrupadas en residuos de comida y residuos ricos en fibra y las 8 fracciones encontradas en el trabajo realizado por González *et al.* (2016) (Figura 6.2b).



**Figura 6.2** Separación de FORSU por fracciones, a) separación en 12 fracciones clasificadas en 4 grupos de RSU de la ciudad de Kioto (Kobayashi *et al.*, 2012) y b) separación en 8 fracciones de la FORSU de la Ciudad de México (González *et al.*, 2016)

#### 6.1.4. Preparación de FORSU y fracciones

Debido a las características heterogéneas de la FORSU y a que el tamaño de los sustratos era grande para permitir la preparación de muestras para el análisis químico y obtener resultados representativos, se realizó una disminución del tamaño de partícula de la FORSU y de cada una de las fracciones identificadas. Estas fueron trituradas y molidas para homogeneizarla.

Inicialmente se utilizó una licuadora tipo industrial (Figura 6.3a) marca International modelo LI-5 con 5 hp de potencia, tiene navajas afiladas que giran a gran velocidad y una capacidad de 5 litros. El tamaño de partícula que se logra con este equipo es de 1 a 10 cm.

Posteriormente se pasaron los residuos por un extrusor marca Nixtamatic (Figura 6.3b) que cuenta con un motor de 1/3 hp de potencia. El método utilizado en este extrusor es principalmente por compresión combinado con corte por la cuchilla que se encuentra en la parte final del cilindro. Sobre la cuchilla se coloca una placa metálica que cuenta con perforaciones circulares de 8 mm. El tamaño de partícula obtenido se encuentra en el intervalo de 10 a 0.5 mm.

Por último, se usó un molino de discos (Figura 6.3c) con motor marca Molinos del Rey de 1/2 hp de potencia para disminuir el tamaño de partícula de 0.5 a 0.1 mm. La reducción de tamaño de partícula se logra por frotamiento de cizalla.

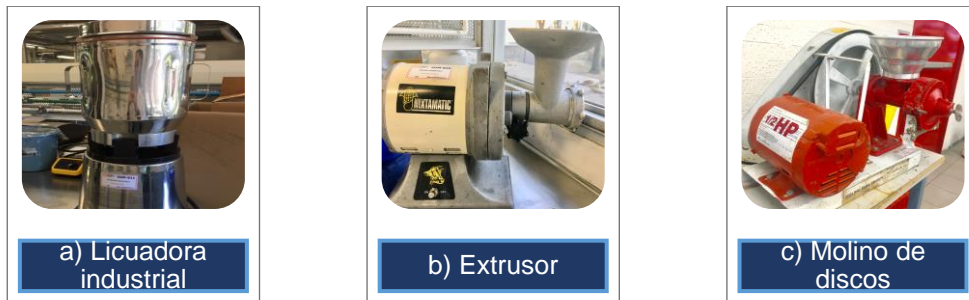


Figura 6.3. Equipo utilizado para homogeneizar la muestra

## 6.2. Caracterización de muestras

La caracterización es una parte esencial de este trabajo, ya que da información acerca de la materia biodegradable y no biodegradable y el contenido de nutrientes que influyen en el proceso de digestión anaerobia. Las determinaciones realizadas para la caracterización de la FORSU y cada una de las fracciones fueron fisicoquímicas y bromatológicas. Estas últimas se utilizan para conocer la composición de alimentos en general, como se muestra en la Figura 6.4. Cada una de las determinaciones se realizó mínimo por triplicado.

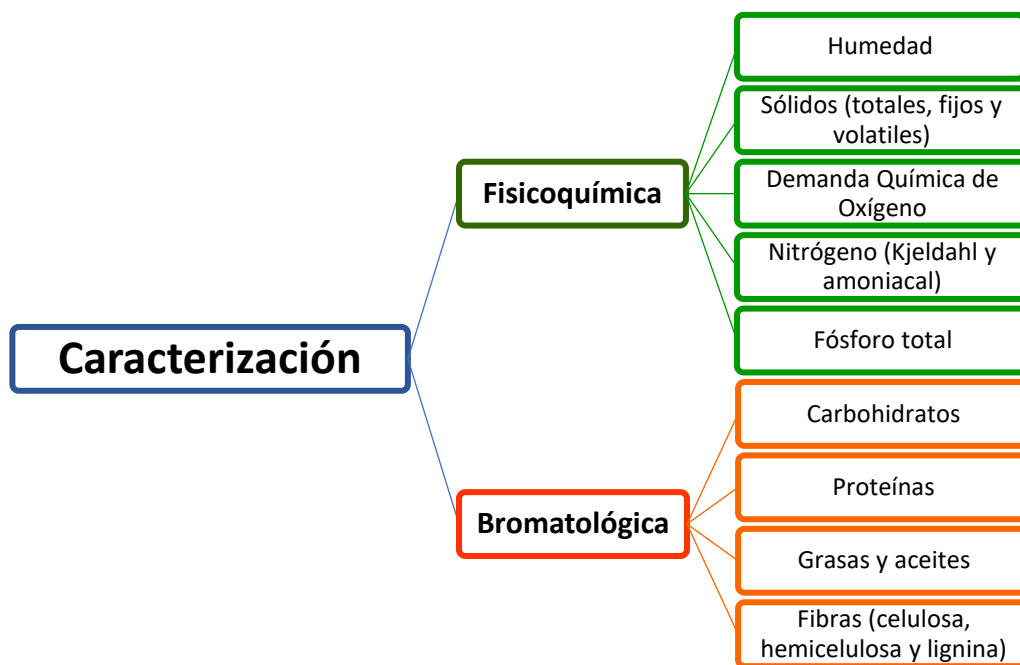


Figura 6.4. Esquema de caracterización de FORSU y componentes

En el caso de lodos granulares, se realizó una caracterización para conocer el contenido de sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF), sólidos volátiles (SV) y humedad. En la Tabla 6.1 se presentan las técnicas utilizadas para la determinación de las características físicas y químicas de los sustratos.



**Tabla 6.1.** Técnicas analíticas empleadas para caracterizar FORSU y sus componentes

| Determinación                           | Técnica o principio   | Método   |
|---|---|--|
| <b>Humedad</b>                          | Gravimetría, se obtiene por diferencia entre el peso inicial de la muestra y los sólidos totales determinados. Se expresa como porcentaje   | APHA-2540 B  |
| <b>Sólidos totales (ST)</b>             | Gravimetría. Sólidos secados a una temperatura de 105°C.  | APHA-2540 B  |
| <b>Sólidos volátiles (SV)</b>           | Gravimetría. Contenido de sólidos de una muestra secada a 105°C e incinerada a 550°C.   | APHA-2540 E  |
| <b>Sólidos fijos (SF)</b>               | Gravimetría. Contenido de sólidos que permanecen en la muestra después de exponerla a 550 °C durante 15 minutos   | APHA-2540 E  |
| <b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b> | Fotometría. Digestión ácida por reflujo cerrado a 150°C con reactivos preparados durante 2 horas, lectura a 600 nm.   | APHA- 5220 D   |
| <b>Nitrógeno Kjeldahl (NK)</b>          | Digestión ácida con catalizador de selenio por el método de Wieninger (Merck, 2009) y posterior neutralización, destilación y titulación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.02 N. | APHA-Norg A  |
| <b>N-NH<sub>4</sub></b>                 | Destilación y titulación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.02N   | APHA-4500-NH <sub>3</sub> C y 4500-NH <sub>3</sub> E |
| <b>Fósforo total (PT)</b>               | Digestión ácida con ácido sulfúrico y ácido nítrico. Método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico a 470 nm   | APHA-4500-P B<br>APHA-4500-P C                       |
| <b>pH</b>                               | Medición con potenciómetro  | APHA-4500 B  |

En la Tabla 6.2 se enlistan las técnicas analíticas que se utilizaron para la caracterización bromatológica y las técnicas empleadas para cuantificar diferentes fracciones de biomoléculas de cualquier alimento, en este caso, residuos orgánicos.

En el caso de las técnicas que se utilizaron para el cálculo de proteínas y carbohidratos se requieren de muestras en húmedo. Mientras que la muestra seca se requiere para grasas y aceites y la muestra seca y desgrasada en las técnicas para determinación de celulosa, hemicelulosa y lignina.

**Tabla 6.2.** Técnicas analíticas para el análisis bromatológico de la FORSU y sus componentes

| Determinación                           | Técnica o principio   | Método                      |
|---|---|-----------------------------|
| <b>Hidratos de carbono</b>              | Fotometría con fenol y sulfato de hidracina a 490 nm por el método colorimétrico. | Dubois <i>et al.</i> (1956) |
| <b>Grasas y aceites</b>                 | Gravimetría. Extracción con solventes orgánicos y posterior evaporación           | AOAC 920.39<br>AOAC 954.02  |
| <b>Proteínas</b>                        | Nitrógeno Kjeldahl multiplicado por factor de 6.25                                | AOAC 988.05                 |
| <b>Hemicelulosa, celulosa y lignina</b> | Gravimetría. NDF-Fibra detergente neutra.   | Van Soest (1967)            |
| <b>Celulosa y lignina</b>               | Gravimetría. ADF-Fibra detergente ácida y ácido sulfúrico al 72% (AOAC, 2012).    | AOAC 973.18                 |



### 6.3. Producción de metano

Para determinar la producción de metano de la FORSU y fracciones identificadas, se realizaron ensayos por triplicado de cada una de las muestras en frascos de 500 ml (Figura 6.5) con agitación continua a 110 rpm, a 35°C constantes (intervalo mesófilo) y con una duración de 21 días

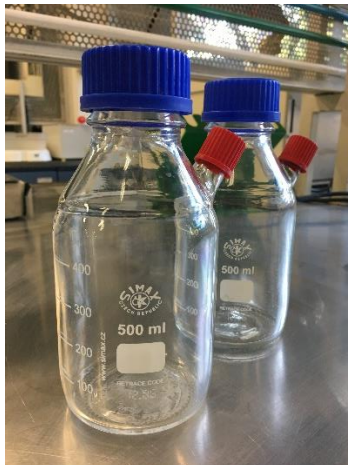


Figura 6.5. Frascos para digestión anaerobia

#### Prueba de potencial bioquímico de metano

El potencial bioquímico de metano es una prueba que permite conocer la cantidad de metano producido por un sustrato en presencia de microorganismos bajo condiciones anaerobias. Para la realización de esta prueba, se empleó una relación de inóculo basado en sólidos volátiles a sustrato de 4: 1. Por lo tanto, para cada prueba, se colocaron en los frascos 8 gSV de inóculo y 2 gSV de muestra.

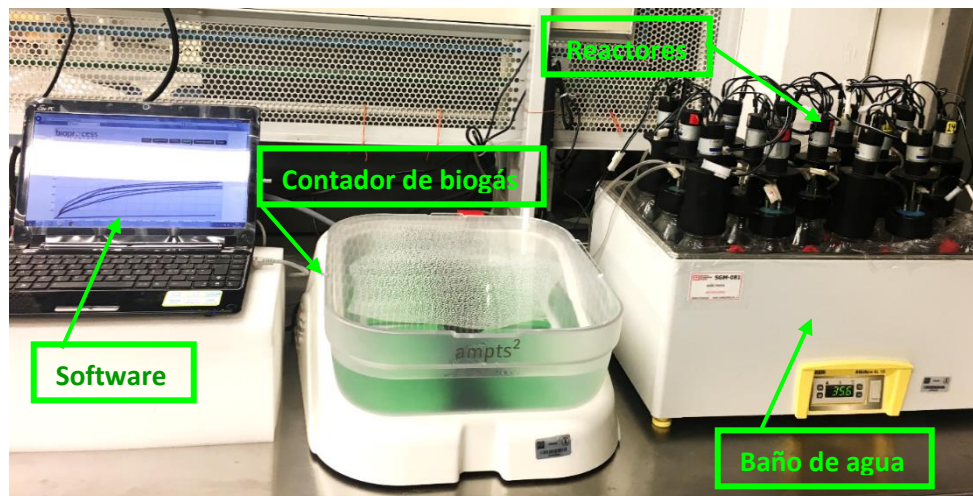
El inóculo empleado para realizar las pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), se obtuvo de un reactor UASB de la planta de tratamiento de aguas residuales de la cervecera Grupo Modelo SA de CV, ubicada en la Ciudad de México. Los lodos granulares anaerobios fueron transportados y refrigerados en la cámara fría del Laboratorio de Ingeniería Ambiental en el Instituto de Ingeniería a 4.5° C.

Los gránulos fueron lavados y concentrados tres veces mediante centrifugación a 2500 rpm durante 5 min. Con estas centrifugaciones se removieron sustancias solubles remanentes para disminuir la producción de metano por sustancias ajenas a la FORSU. Al finalizar cada centrifugación se eliminó el sobrenadante y se reemplazó la misma cantidad con agua limpia para eliminar la mayor cantidad de sustrato disuelto remanente.

De acuerdo con la guía VDI 4360, se preparó una solución con micronutrientes y se añadió 1 ml a cada frasco. La solución contenía 2,000 mg/L  $\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 2,000 mg/L  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 500 mg/L  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 30 mg/L  $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 50 mg/L  $\text{ZnCl}_2$ , 50 mg/L  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 50 mg/L  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 90 mg/L  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 1,000 mg/L EDTA, y 1 mg/L de HCl. Además, se añadió a cada frasco para completar 400 ml de volumen, una solución amortiguadora de fosfatos 0.1 M a pH de 7.

El equipo utilizado para esta prueba fue el AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System), Figura 6.6, marca Bioprocess Control, el cual está conformado por 15 reactores con capacidad de 500 ml, cada uno con sistema de agitación individual. En este dispositivo los reactores se mantienen en un baño de agua con temperatura controlada.

Los tapones de plástico utilizados para cerrar los frascos de reacción tienen una salida que conduce al biogás producido a un frasco lavador de dióxido de carbono si se desea cuantificar metano, o directamente al contador si se desea cuantificar biogás. El contador es un recipiente con agua, en el cual hay 15 celdas calibradas a un volumen determinado (cada celda corresponde a una salida de un frasco) y cuenta con sensores de temperatura y presión para normalizar el metano o el biogás cuantificado a 0°C y 1 atm (NL= litros normalizados). El biogás generado desplaza el agua dentro de cada celda y, por fuerza boyante, la celda abre liberando el biogás a la atmósfera, y cada vez que la celda abre se envía una señal al software para cuantificar el volumen de metano o biogás con respecto al tiempo.



**Figura 6.6.** Sistema automático de potencial de metano

Al comenzar las pruebas, el aire se arrastró, logrando que el oxígeno del medio sea desplazado por medio de nitrógeno. El biogás producido se cuantificó sin remover CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. La composición del biogás se determinó diariamente tomando con una jeringa 0.5ml de muestra de cada reactor e introduciéndola en un cromatógrafo de gases, el cual utiliza helio como gas acarreador (Tabla 6.3).

**Tabla 6.3.** Métodos realizados para cuantificar la producción de metano

| Determinación   | Técnica o principio   | Método                                   |
|---|---|--|
| <b>Producción de biogás</b>                                     | Desplazamiento por volumen y captura de la información con un sistema automatizado.   | VDI4630-Asociación Alemana de Ingenieros |
| <b>Composición del biogás (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>)</b> | Cromatógrafo de gases SRI Modelo 8610C, equipado con detector de conductividad térmica. La temperatura del detector es de 150 °C. |  |

#### 6.4. Selección de sustratos de referencia

Se realizó una cuarta etapa en donde se seleccionaron sustratos de referencia para poder comparar sustratos limpios con los residuos mezclados que se presentaron en la FORSU de la Ciudad de México. Las razones por las que se optó por el uso de estos residuos en particular están basadas por su presencia durante la separación de fracciones, los resultados obtenidos en etapas anteriores, los grandes volúmenes que se generan en México, disponibilidad durante el año y su contenido de fibras.

Estos sustratos se prepararon al igual que la FORSU y sus fracciones, como se menciona en el punto 5.1.4. En el caso de muestras con un contenido de humedad menor al 60% se utilizó después de la licuadora industrial, un molino de café y especias de la marca KRUPS (Figura 6.7). Los sustratos se caracterizaron como se describe en la figura 5.4 del apartado 5.2. Al igual se realizó potencial bioquímico de metano a cada muestra por triplicado como se menciona en el punto 6.3.



**Figura 6.7.** Molino para sustratos con humedad menor al 60%

#### Análisis estadístico

Se utilizó Excel como herramienta de cálculo para llevar a cabo el análisis estadístico de las curvas de producción de biogás. Así como los análisis ANOVA y de correlación como regresiones lineales por el método de mínimos cuadrados, para determinar el efecto del contenido de material lignocelulósico sobre la producción de biogás y metano.



## 7. RESULTADOS

### 7.1. Obtención, separación y preparación de muestra

#### 7.1.1 Obtención de la muestra

El día 16 de febrero de 2017 se llevó a cabo el muestreo en la estación de transferencia de Coyoacán, siendo jueves, día en que reciben únicamente residuos orgánicos. En esta estación, diariamente entran a descargar entre 380 y 450 camiones; de este total se consideraron 11 camiones y se tomaron de cada uno aproximadamente 50 kg. La metodología empleada para el muestreo se hizo con base en la Norma NMX-AA-015-1985 y la determinación del peso volumétrico *in situ* con base en la Norma NMX-AA-019-1985 (Anexo A).

En la Figura 7.1 se observan las etapas del proceso de muestreo; en la imagen 7.1a se muestra uno de los camiones recolectores de basura del cual se obtuvieron parte de los residuos orgánicos. Posteriormente se puede observar (Figura 7.1b) la forma en la que se obtuvieron las muestras, ya que los camiones vaciaban parte de su carga en el piso para permitir la recolección de una muestra aproximada de 50 kg. En la Figura 7.1c se puede ver el total de residuos obtenidos a partir de los 11 camiones seleccionados aleatoriamente, una vez que ya se encontraban mezclados. La Figura 7.1d muestra el cuarteo realizado. Los residuos obtenidos se mezclaron a fondo utilizando palas y rastrillos y se realizó la división de los residuos en cuatro partes de igual tamaño (aproximadamente) para posteriormente retirar y desechar dos partes opuestas. Se volvieron a mezclar las dos partes restantes, formando una pila, que nuevamente se dividió en cuatro partes y se descartaron dos.

En la Figura 7.1e se obtuvo el peso de la muestra que finalmente se tomó para las pruebas, siendo de 200 kg, descartando los componentes inorgánicos de gran tamaño que fueron previamente removidos a mano. Por último, se realizó el empacado de los residuos en bolsas herméticas Ziploc rotuladas, con 2 kg cada una aproximadamente. Las muestras obtenidas se transportaron al Laboratorio de Ingeniería Ambiental en el Instituto de Ingeniería y se mantuvieron en congelación a -20 °C hasta su separación y análisis.

#### 7.1.2 Cuarteo en laboratorio

Previo a la caracterización de la FORSU, se tomaron aproximadamente 20 kilos, los cuales se descongelaron en la cámara fría y posteriormente se llevaron al laboratorio para realizar 2 cuarteos más con la finalidad de asegurar que la muestra fuera representativa. En la Figura 7.2 se muestra el proceso que se siguió en cumplimiento con la norma NMX-AA-015-1985.





**Figura 7.1.** Etapas del proceso de muestreo: a) camiones de recolección de residuos y b) descarga de residuos para la obtención de la muestra, c) mezcla obtenida de los residuos de 11 camiones, d) cuarteo en sitio, e) Pesaje de residuos, f) almacenamiento de FORSU en bolsas Ziploc para su posterior congelación.

### 7.1.3 Separación de fracciones

De los residuos almacenados en refrigeración se tomaron aproximadamente 15 kilos y se descongelaron en la cámara fría para inmediatamente después iniciar su separación manual en el laboratorio. Se colocaron platos sobre la mesa del laboratorio con el nombre de cada una

de las fracciones para poder realizar la separación de forma ordenada, tomando como base la separación realizada por González *et al.* (2016) (Figura 7.3).



**Figura 7.2.** Cuarteo en laboratorio: a) 20 kilos de residuos, b) división de FORSU en 4 partes, c) eliminación de 2 partes opuestas, se repite procedimiento y d) muestra representativa de FORSU para su caracterización.

Una vez terminada la separación (Figura 7.4) se pesaron cada una de las fracciones en húmedo, se guardaron los residuos por separado en bolsas con cierre hermético identificadas con el nombre de las fracciones y se mantuvieron nuevamente a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 7.3.** Fracciones identificadas al inicio de la separación de la FORSU

Las fracciones identificadas fueron: fruta, vegetales, residuos de origen animal, harinas, poda fresca, hojas secas, ramas y madera, papel, contaminantes inorgánicos y residuos sin clasificar. En la Tabla 7.1 se mencionan las fracciones, la descripción de los residuos identificados y su peso en base húmeda.

La composición en base húmeda que tiene la FORSU de la Ciudad de México se presenta en la Figura 7.5, donde se puede observar que los residuos de frutas se encuentran en mayor cantidad (36%), seguido de los residuos que no se pudieron clasificar (20%) y los residuos de vegetales (13%). Con menor proporción se encuentran los residuos contaminantes (1%), el papel (2%) y las harinas (3%).

De acuerdo con Naroznova *et al.* (2016), los criterios de clasificación utilizados para la FORSU varían en relación con las legislaciones de cada país, por lo que la asignación y restricciones de materiales ricos en fibras (por ejemplo: vegetación y desechos de papel) pueden variar significativamente de país a país.

En la Ciudad de México la composición en base seca de los residuos que se espera que tengan un mayor contenido de fibras lignocelulósicas (poda fresca, hojas secas, ramas, papel y sin clasificar) comprenden casi la mitad de la FORSU (46%).

## 7.2. Caracterización

Es bien sabido que la biodegradabilidad anaerobia de la materia está relacionada con su composición (Reposo *et al.*, 2011), por lo que se realizó la caracterización de 9 de las 10 fracciones identificadas en la FORSU de la Ciudad de México. Debido a que no se tomó en



cuenta la fracción de contaminantes que estaba compuesta por materiales muy poco o no biodegradables, por lo que no contribuyen a la producción de metano. La FORSU en general también fue caracterizada.



**Figura 7.4.** Fracciones identificadas en la FORSU de la Ciudad de México

### 7.2.1 Sólidos totales, volátiles, fijos y humedad

Una vez que los residuos fueron reducidos hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 1 mm, se comenzó la caracterización de los sustratos. En la Tabla 7.2 se muestra el contenido de sólidos totales, volátiles, fijos y humedad de la FORSU y sus fracciones.



**Tabla 7.1.** Descripción de fracciones identificadas en la FORSU de la Ciudad de México

| <b>FRACCIÓN</b>       | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>IMAGEN</b>   | <b>PESO HUMEDO (g)</b> |
|-----------------------|--|---|------------------------|
| <b>FRUTAS</b>         | Cáscaras de naranja, limón, piña, sandía, melón, cáscaras y trozos de plátano, mamey, cáscara y huesos de mango, uvas y papaya.  |    | 5293                   |
| <b>VEGETALES</b>      | Jícama, zanahoria, variedad de chiles (ancho, de árbol, poblano), cáscaras de tamarindo, cacahuete, cáscaras y trozos de papa, cáscara y hueso de aguacate, betabel entero, chicharos, granos de elote, ajo, cáscara y raíces de cebolla y semillas de girasol, naranja y limón. |    | 1917                   |
| <b>ORIGEN ANIMAL</b>  | Cáscara de huevo rojo y blanco, carne de res, huesos de res y pollo, así como carne y piel de pollo.   |    | 1176                   |
| <b>HARINAS</b>        | Trozos de tortillas.   |   | 441                    |
| <b>PODA FRESCA</b>    | Buganvilia, pasto fresco, hoja de pino, hojas de eucalipto, de palma y de fresno.  |  | 294                    |
| <b>HOJAS SECAS</b>    | Hojas secas de árboles y hojas de maíz (tamal).  |  | 1029                   |
| <b>RAMAS</b>          | Ramas de árboles y trozos de madera.   |  | 883                    |
| <b>PAPEL</b>          | Servilletas y en menor cantidad papel encerado.  |  | 294                    |
| <b>CONTAMINANTES</b>  | Piedras, tela, vidrio, plástico, colillas de cigarro, corcholatas de aluminio y espuma floral.   |  | 147                    |
| <b>SIN CLASIFICAR</b> | Residuos de hojas secas y poda mezclados con objetos sobrantes de las fracciones anteriores en tamaño reducido.  |  | 2940                   |



En este trabajo se observa que los residuos con mayor contenido de humedad (72-78%) son los vegetales, las frutas y la poda fresca, mientras que los residuos con menor contenido de humedad son las ramas con 45%, seguido de los residuos de origen animal y harinas, con 55 y 56 %, respectivamente.

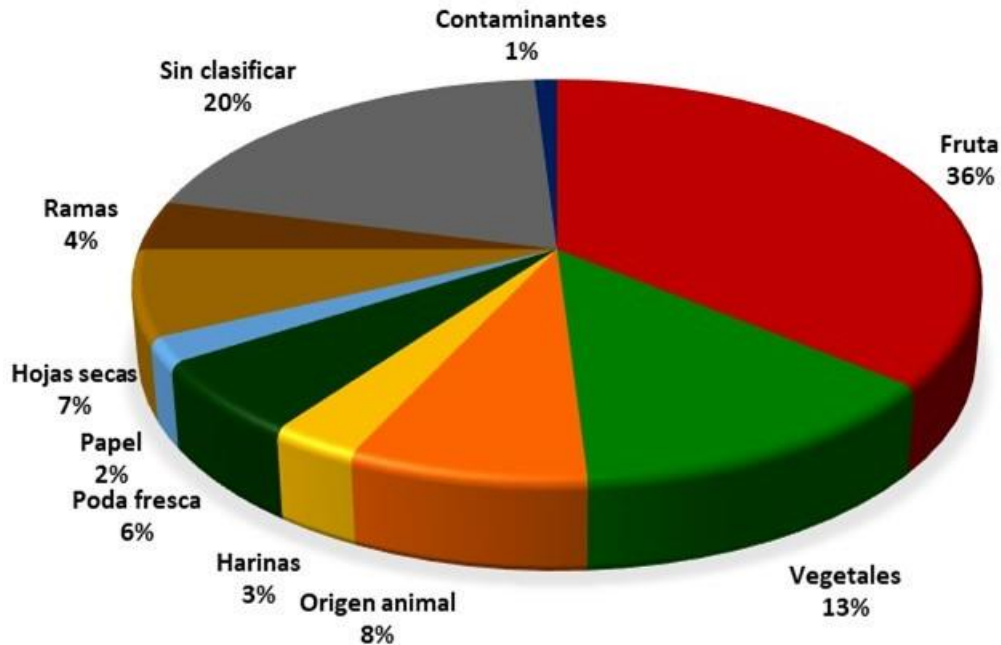


Figura 7.5. Composición de fracciones en base húmeda

Comparando los resultados con los obtenidos por Naroznova *et al.* (2016) se observan valores similares ya que presenta un contenido de humedad en vegetales del 76 % mientras que la fracción de frutas y vegetales en este trabajo tiene 77 y 78 %, respectivamente. Los residuos de origen animal de Naroznova *et al.* (2016), tienen 59 % de humedad y en el presente trabajo tienen 55 %. Los vegetales para Naroznova *et al.* (2016), tienen el 73 % de humedad y el obtenido en la poda fresca es del 72%. Sin embargo, el papel sucio presenta un porcentaje de humedad menor (46%) que el encontrado en este trabajo (69%). Campuzano y González-Martínez (2016), reportan 70.3 % de humedad en la FORSU de la Ciudad de México, similar al que se muestra en este trabajo de 71%.

La relación SV/ST es un indicador de cuánto es el contenido de material orgánico con respecto a los sólidos totales presentes en cada fracción de los residuos. En la Tabla 7.2 se puede observar que las frutas y las harinas poseen la relación más alta con 0.90 y 0.87, respectivamente, destacando el alto potencial de transformación orgánica de estos sustratos en el proceso de digestión anaerobia. Campuzano y González-Martínez (2016) muestran para FORSU una relación (0.75) similar a la obtenida en este trabajo.

La fracción encontrada en la FORSU de la Ciudad de México con menor valor en la proporción SV/ST es la de origen animal (0.70), ya que contiene cascarones de huevo que son ricos en carbonato de calcio y también hay presencia de huesos de animales, los cuales tampoco se pueden volatilizar fácilmente a 550 °C (González *et al.*, 2016).



**Tabla 7.2.** Contenido de humedad, sólidos y relación SV/ST. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Fracción       | Humedad (%)  | Sólidos totales (g/kg) | Sólidos volátiles (g/kg) | Sólidos fijos (g/kg) | SV/ST |
|----------------|--------------|------------------------|--------------------------|----------------------|-------|
| Frutas         | 77 ± 0.2 (3) | 230 ± 2.5 (3)          | 206 ± 4.3 (3)            | 24 ± 1.9             | 0.90  |
| Vegetales      | 78 ± 0.4 (3) | 228 ± 4.5 (3)          | 192 ± 2.8 (3)            | 37 ± 1.7             | 0.84  |
| Origen animal  | 55 ± 0.6 (3) | 455 ± 5.7 (3)          | 320 ± 2.6 (3)            | 135 ± 4.0            | 0.70  |
| Harinas        | 56 ± 0.4 (3) | 439 ± 1.2 (3)          | 380 ± 3.5 (3)            | 59 ± 3.6             | 0.87  |
| Poda fresca    | 72 ± 0.2 (3) | 279 ± 1.8 (3)          | 227 ± 1.6 (3)            | 52 ± 0.5             | 0.81  |
| Hojas secas    | 64 ± 0.2 (3) | 363 ± 2.0 (3)          | 306 ± 2.4 (3)            | 57 ± 0.3             | 0.84  |
| Ramas          | 45 ± 0.1 (3) | 552 ± 1.2 (3)          | 475 ± 4.9 (3)            | 78 ± 4.9             | 0.86  |
| Papel          | 69 ± 0.1 (3) | 309 ± 1.2 (3)          | 265 ± 1.3 (3)            | 43 ± 2.5             | 0.86  |
| Sin clasificar | 66 ± 0.5 (5) | 343 ± 4.8 (5)          | 252 ± 4.0 (5)            | 91 ± 3.0             | 0.73  |
| FORSU          | 71 ± 1.1 (5) | 291 ± 3.1 (5)          | 228 ± 3.0 (5)            | 57 ± 1.7             | 0.78  |

La fracción con menor contenido de sólidos volátiles corresponde a los vegetales (192 g/kg) y la mayor corresponde a las ramas (475 g/kg). Naroznova *et al.* (2016) presentan valores similares con respecto al contenido de sólidos volátiles en las siguientes fracciones: residuos de origen animal (344 g/kg), vegetales (223 g/kg) y residuos de vegetación (240 g/kg). Sin embargo, en el caso del papel si hay diferencia al reportar 491 g/kg y obtener en este trabajo 265 g/kg. En cuanto a la FORSU, Campuzano y González- Martínez (2016), reportan un contenido de SV de 223 g/kg, similar al obtenido en este trabajo.

#### 7.2.2. Demanda química de oxígeno, nitrógeno y fósforo total

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que representa la cantidad de oxígeno requerido para oxidar material orgánico por medio de dicromato de potasio en un medio ácido. Este parámetro es comúnmente utilizado para caracterizar el contenido orgánico total de las sustancias, así como en la predicción de la generación de metano. En este trabajo se determinó también la DQO de cada sustrato y los resultados del análisis se presentan en la Tabla 7.3.

**Tabla 7.3.** Demanda química de oxígeno, relación DQO/SV, DQO/ST y aporte con respecto a la FORSU. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Fracción       | DQO (g/kg <sub>ST</sub> ) | DQO/SV | DQO/ST | Aporte (% en FORSU) |
|----------------|---------------------------|--------|--------|---------------------|
| Frutas         | 1287 ± 71.4 (7)           | 1.44   | 1.29   | 29                  |
| Vegetales      | 1311 ± 90.9 (7)           | 1.55   | 1.31   | 10                  |
| Origen animal  | 1274 ± 45.6 (7)           | 1.81   | 1.27   | 12                  |
| Harinas        | 1222 ± 58.4 (7)           | 1.41   | 1.22   | 4                   |
| Poda fresca    | 1395 ± 81.0 (7)           | 1.71   | 1.39   | 6                   |
| Hojas secas    | 1224 ± 72.4 (7)           | 1.45   | 1.22   | 8                   |
| Ramas          | 742 ± 23.4 (7)            | 0.86   | 0.74   | 5                   |
| Papel          | 1430 ± 64.0 (7)           | 1.49   | 1.5    | 3                   |
| Sin clasificar | 1265 ± 77.2 (7)           | 1.72   | 1.27   | 23                  |
| FORSU          | 1014 ± 47.2 (7)           | 1.29   | 1.01   | 100                 |

La DQO se puede asociar también con el contenido de sólidos volátiles (DQO/SV) de una muestra para obtener más información sobre el potencial de biodegradabilidad. La relación



más baja la tienen las ramas con 0.86, seguida de la FORSU y las harinas con 1.29 y 1.41, respectivamente, mientras que los valores que presentan la relación más alta son los residuos de origen animal (1.81) y sin clasificar (1.72). Se puede ver también en la Tabla 7.3 que el mayor aporte de DQO lo dan los residuos de frutas con un 29 %, mientras que el menor lo tiene el papel con solo 3 %.

Se determinó también la composición de cada una de las muestras con respecto al contenido de nutrientes que influyen en el desarrollo del proceso de digestión anaerobia. Los nutrientes están representados por el nitrógeno (N) y fósforo (P) presentes en la FORSU y son elementos necesarios para un buen desempeño de los microorganismos, pero también pueden causar inhibición, por lo que se debe controlar su presencia para poder ser utilizado el digestato resultante como mejorador de suelos. El nitrógeno orgánico puede ser un compuesto inhibitorio, ya que su hidrólisis produce nitrógeno amoniacal. Las condiciones inhibitorias pueden ser causadas por altas concentraciones de nitrógeno de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) liberado a partir de proteínas o por altas concentraciones de ácidos grasos de cadena larga liberados de los lípidos (Alibardi *et al.*, 2016). La presencia de estos dos grupos de compuestos orgánicos puede, por lo tanto, producir condiciones beneficiosas o inhibitorias durante la digestión anaerobia.

En la Tabla 7.4 se muestran los valores de nitrógeno Kjeldahl (NK) como nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (N- $\text{NH}_4$ ) y fósforo total (PT). El valor más alto de nitrógeno lo presentan los residuos de origen animal tanto en NK como en el nitrógeno amoniacal y el más bajo lo tiene el papel también para ambos. El valor reportado por Campuzano y González-Martínez (2016) para NK de FORSU es 18.2 g/kg<sub>ST</sub>, similar al obtenido en este trabajo. El mayor aporte de NK lo tienen los residuos de origen animal con 30% y el menor aporte lo tiene el papel con solo 1%.

En cuanto al nitrógeno amoniacal, el mayor aporte lo dan los residuos sin clasificar con 28% y el menor aporte lo tiene la fracción de papel y harinas con 1%. González *et al.* (2016) muestran el mayor aporte en los residuos sin clasificar (40.3%) y el menor al igual que en el presente trabajo, es por parte del papel (0.9%).

**Tabla 7.4.** Contenido de nitrógeno y fósforo y aporte con respecto a la FORSU. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Fracción       | NK                 | N- $\text{NH}_4$ | PT             | N                | N- $\text{NH}_4$ | PT  |
|----------------|--------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|-----|
|                | g/kg <sub>ST</sub> |                  |                | Aporte (% FORSU) |                  |     |
| Frutas         | 13.4 ± 0.4 (3)     | 1.0 ± 0.07 (3)   | 15.9 ± 0.8 (7) | 22               | 20               | 35  |
| Vegetales      | 16.3 ± 0.7 (3)     | 1.3 ± 0.08 (3)   | 18.9 ± 0.2 (7) | 9                | 11               | 15  |
| Origen animal  | 42.0 ± 1.8 (3)     | 1.7 ± 0.12 (3)   | 8.3 ± 0.4 (7)  | 30               | 18               | 8   |
| Harinas        | 17.1 ± 0.7 (3)     | 0.4 ± 0.03 (3)   | 9.0 ± 0.1 (7)  | 4                | 1                | 3   |
| Poda fresca    | 16.5 ± 1.2 (3)     | 1.1 ± 0.09 (3)   | 14.0 ± 0.4 (7) | 5                | 5                | 6   |
| Hojas secas    | 12.0 ± 0.8 (3)     | 1.2 ± 0.10 (3)   | 10.5 ± 0.3 (7) | 6                | 8                | 7   |
| Ramas          | 12.8 ± 0.6 (3)     | 1.3 ± 0.01 (3)   | 2.4 ± 0.3 (7)  | 3                | 8                | 1   |
| Papel          | 8.5 ± 0.4 (3)      | 0.7 ± 0.06 (3)   | 10.5 ± 0.5 (7) | 1                | 1                | 2   |
| Sin clasificar | 15.3 ± 0.5 (3)     | 1.4 ± 0.12 (3)   | 12.9 ± 0.6 (7) | 20               | 28               | 23  |
| FORSU          | 21.1 ± 0.5 (3)     | 3.6 ± 0.11 (3)   | 13.5 ± 0.6 (7) | 100              | 100              | 100 |

Por último, en la Tabla 7.4 se observa que las ramas presentan el contenido de fósforo más bajo, mientras que el más alto lo tienen los residuos de vegetales con 18.9 g/kg<sub>ST</sub>. La FORSU consigue el mayor aporte de fósforo por las frutas con un 35% y el menor lo tienen las ramas





con 1%. González *et al.* (2016) muestra que el mayor aporte lo dan los residuos sin clasificar con 67.6% y el menor los residuos de papel con 0.4%.

### 7.2.3. Caracterización bromatológica

#### 7.2.3.1 Fibras

El rendimiento de metano durante la digestión anaerobia depende de la cantidad de sólidos volátiles biodegradados, así como por la naturaleza del sólido (Cabbai, *et al.*, 2013), por lo que es fundamental distinguir los compuestos bioquímicos que forman los sólidos volátiles en diferentes sustratos. Por esta razón se complementa la caracterización con análisis bromatológicos, ya que permiten conocer el contenido de proteínas, lípidos, carbohidratos y fibras de cualquier alimento. Las fibras (compuestos lignocelulósicos) aportan sólidos volátiles (fracción orgánica), sin embargo, se sabe que son difíciles de degradar biológicamente bajo condiciones anaerobias.

Los resultados obtenidos de la caracterización bromatológica de FORSU de la Ciudad de México se compararon con trabajos descritos en el capítulo 4.3: Kobayashi *et al.* (2012), Naroznova *et al.* (2016), Alibardi y Cossu (2016), Campuzano y González-Martínez (2016), González *et al.* (2016) y Edwiges *et al.* (2018), los cuales analizaron la FORSU de diferentes países y sus fracciones identificadas.

En la Tabla 7.5 se observan los compuestos lignocelulósicos presentes en la FORSU y sus componentes. Cada determinación se realizó por triplicado. Los trabajos anteriormente mencionados utilizaron el método de caracterización donde se emplean detergentes específicos y permite diferenciar la FDN y FDA, por lo se logró comparar resultados. De lo contrario no hubiera sido posible debido a las interferencias que presenta este método.

**Tabla 7.5.** Contenido de material lignocelulósico y aportes con respecto a la FORSU.

| Fracción       | Celulosa           | Hemicelulosa | Lignina | Celulosa       | Hemicelulosa | Lignina |
|----------------|--------------------|--------------|---------|----------------|--------------|---------|
|                | g/kg <sub>SV</sub> |              |         | Aporte % FORSU |              |         |
| Frutas         | 121                | 7            | 32      | 50             | 6            | 12      |
| Vegetales      | 102                | 63           | 65      | 13             | 13           | 8       |
| Origen animal  | 4                  | 3            | 39      | <1             | <1           | 4       |
| Harinas        | 53                 | 232          | 32      | 4              | 23           | 2       |
| Poda fresca    | 111                | 51           | 69      | 7              | 5            | 4       |
| Hojas secas    | 98                 | 49           | 68      | 12             | 9            | 7       |
| Ramas          | 36                 | 155          | 401     | 3              | 18           | 26      |
| Papel          | 207                | 20           | 32      | 3              | <1           | <1      |
| Sin clasificar | 33                 | 62           | 165     | 8              | 25           | 37      |
| FORSU          | 102                | 9            | 52      | 100            | 100          | 100     |

En la Tabla 7.5 se puede observar que el mayor contenido de celulosa lo tiene el papel con 207 g/kg<sub>SV</sub> seguido de las frutas con 121 g/kg<sub>SV</sub>. Kobayashi *et al.* (2012) y González *et al.* (2016) también presentan el mayor contenido de celulosa en el papel, mientras que Naroznova *et al.* (2016) muestran el mayor contenido en el cartón sucio, seguido de fibras moldeables. Valores similares de celulosa se encuentra en el trabajo de Naroznova *et al.* (2016) en la fracción de vegetales (frutas y vegetales) con 120 g/kg<sub>SV</sub>.



El menor contenido de celulosa en este trabajo lo tienen los residuos de origen animal con 4 g/kg<sub>SV</sub>, al igual que Alibardi y Cossu (2016) con <1%SV. De forma similar Kobayashi *et al.* (2012) presentan el menor contenido de celulosa en los residuos de origen animal sin consumir con 1.6 %SV y Naroznova *et al.* (2016) también presentan el menor valor en los residuos de origen animal con 2 %SV. El trabajo de Edwiges *et al.* (2017) muestra un valor medio de celulosa en frutas y vegetales de 17.1%SV y en el presente trabajo la celulosa obtenida en estas fracciones fue de 121 y 102 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. En este trabajo el mayor aporte de celulosa a la FORSU lo tienen las frutas con un 50%, mientras que el menor aporte se encuentra en los residuos de origen animal con <1%.

En cuanto a la hemicelulosa el menor contenido lo presentan los residuos de origen animal con 3 g/kg<sub>SV</sub>. Sin embargo, Kobayashi *et al.* (2012) lo tienen en la fracción de otros residuos de cocina con 2.7 %SV y Naroznova *et al.* (2016) en el papel sucio con 3 %SV. González *et al.* (2016) presentan valores similares a este trabajo en la fracción de frutas con 10 g/kg<sub>SV</sub>. El mayor contenido de hemicelulosa en este trabajo está presente en los residuos de harinas con 232 g/kg<sub>SV</sub>. Kobayashi *et al.* (2012) tienen el mayor contenido en los residuos de café y té, mientras que Naroznova *et al.* (2016) y Alibardi y Cossu (2016) lo muestran en la paja para animales y en los vegetales, respectivamente. Edwiges *et al.* (2018) muestran un valor medio de hemicelulosa en frutas y vegetales de 9.4 %SV mayor que el obtenido en el presente trabajo. En este trabajo el mayor aporte de hemicelulosa lo tienen los residuos sin clasificar con 25% y el menor las fracciones de papel y origen animal (<1%).

La menor cantidad de lignina en este trabajo la tienen las fracciones de papel, frutas y harinas con 32 g/kg<sub>SV</sub>, mientras que la mayor cantidad de lignina la tienen las ramas con 401 g/kg<sub>SV</sub>, seguido de los residuos sin clasificar con 165 g/kg<sub>SV</sub>. Naroznova *et al.* (2016) presentan el menor contenido de lignina en los residuos de origen animal (2 %SV) y el mayor en los residuos de paja de animal. En ambos trabajos se tienen valores iguales con respecto al contenido de lignina en las fracciones de papel y papel sucio al tener 30 g/kg<sub>SV</sub>.

En cuanto a la fracción de frutas Naroznova *et al.* (2016) y este trabajo tienen resultados similares de lignina al igual que González *et al.* (2016) y Edwiges *et al.* (2018) que presentan un contenido entre 4.5 %SV y 6.4 %SV, respectivamente. En el trabajo de Kobayashi *et al.* (2012) y Alibardi y Cossu (2016) no se presentan valores de lignina de las fracciones, por lo que no fue posible comparar resultados. En este trabajo el mayor aporte de lignina lo dan los residuos sin clasificar (37%) y el menor la fracción de papel (<1%).

#### 7.2.3.2 Carbohidratos, proteínas y grasas

En la Tabla 7.6 se pueden observar los resultados obtenidos para la FORSU y sus fracciones en cuanto al contenido de carbohidratos, proteínas y grasas y aceites, así como los aportes de cada una de las fracciones a la FORSU.

Los resultados que se presentan en la Tabla 7.6, muestran que el mayor contenido de carbohidratos lo tienen los residuos de papel (970 g/kg<sub>SV</sub>). En esta fracción el trabajo de Kobayashi *et al.* (2012) presenta un contenido de carbohidratos en papel para envolver similar con 959 g/kg<sub>SV</sub>. En cuanto al menor contenido de carbohidratos también existe similitud con este trabajo ya que los residuos de origen animal tienen 9.9%SV.

Alibardi y Cossu (2016) y González *et al.* (2016) también obtuvieron el menor contenido en los residuos de origen animal. Campuzano y González-Martínez (2016) reportan en la FORSU un contenido de carbohidratos totales de 529 g/kg<sub>SV</sub>, mientras que el obtenido en el presente



trabajo es mayor (791 g/kg<sub>SV</sub>). En este trabajo el mayor aporte de carbohidratos lo proporcionan las frutas con un 41% y el menor los residuos de origen animal con 2%.

**Tabla 7.6** Contenido de carbohidratos, proteínas y grasas y aportes con respecto a la FORSU. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Fracción       | Carbohidratos      | Proteínas      | Grasas      | CT             | P   | G   |
|----------------|--------------------|----------------|-------------|----------------|-----|-----|
|                | g/kg <sub>SV</sub> |                |             | Aporte % FORSU |     |     |
| Frutas         | 505 ± 23.4 (3)     | 93 ± 3.0 (3)   | 78-83 (2)   | 41             | 23  | 18  |
| Vegetales      | 464 ± 25.8 (3)     | 121 ± 5.5 (3)  | 95-97 (2)   | 12             | 10  | 7   |
| Origen animal  | 70 ± 7.5 (3)       | 373 ± 15.6 (3) | 390-396 (2) | 2              | 27  | 24  |
| Harinas        | 406 ± 16.1 (3)     | 123 ± 5.3 (3)  | 119-122 (2) | 5              | 5   | 4   |
| Poda fresca    | 504 ± 12.2 (3)     | 131 ± 9.3 (3)  | 147-155 (2) | 6              | 5   | 5   |
| Hojas secas    | 394 ± 13.6 (3)     | 89 ± 5.9 (3)   | 156-176 (2) | 9              | 6   | 11  |
| Ramas          | 451 ± 14.5 (3)     | 44 ± 2.3 (3)   | 93-100 (2)  | 7              | 2   | 4   |
| Papel          | 970 ± 44.3 (3)     | 62 ± 2.4 (3)   | 202-204 (2) | 3              | 1   | 2   |
| Sin clasificar | 294 ± 18.6 (3)     | 131 ± 4.3 (3)  | 170-189 (2) | 15             | 21  | 25  |
| FORSU          | 791 ± 41.4 (3)     | 168 ± 4.7 (3)  | 133-136 (2) | 100            | 100 | 100 |

Nota: CT: carbohidratos totales, P: proteínas y G: grasas

Con respecto al contenido de proteínas, los residuos de origen animal son los que presentan mayor contenido (373 g/kg<sub>SV</sub>) y las fracciones de ramas y papel tienen el menor valor con 44 y 62 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. Los valores más altos de proteínas concuerdan con Kobayashi *et al.* (2012) al encontrarse en los restos de cocina de origen animal y residuos de origen animal sin consumir. De igual forma Alibardi y Cossu (2016) obtienen el mayor contenido de proteínas en residuos de carne, pescado y queso. González *et al.* (2016) también lo muestran en la fracción de origen animal, pero con un valor mayor que el reportado por los trabajos anteriores. Edwiges *et al.* (2018) presentan un contenido medio de proteínas en frutas y vegetales de 15.9%SV, similar al obtenido en este trabajo. González *et al.* (2016) también muestran valores similares en estas fracciones al tener 113 y 172 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. Campuzano y González- Martínez (2016) muestran un contenido de proteínas en la FORSU de 152 g/kg<sub>SV</sub>, semejante al obtenido en este trabajo de 168 g/kg<sub>SV</sub>. En cuanto al menor contenido de proteínas, González *et al.* (2016) también lo obtienen en la fracción de papel. En este trabajo el mayor aporte de proteínas a la FORSU lo dan los residuos de origen animal con 27% y el menor aporte lo da el papel con 1%.

Los residuos de origen animal presentan también el mayor contenido de grasas (393 g/kg<sub>SV</sub>) al igual que en el trabajo de Kobayashi *et al.* (2012). Alibardi y Cossu (2016) muestran algo similar al ser los residuos de pescado, carne y queso la fracción con mayor contenido de grasas. Kobayashi *et al.* (2012) obtienen el menor contenido de lípidos en residuos de envoltura de papel, mientras que en este trabajo el menor contenido lo tiene la fracción de frutas con 81 g/kg<sub>SV</sub>. Edwiges *et al.* (2018) muestran como valor medio un contenido de lípidos en frutas y vegetales de 4.5 %SV, mientras que en el presente trabajo se obtiene un valor mayor. Sin embargo, Edwiges *et al.* (2018) llegan a obtener hasta 22 %SV en esta fracción en el mes de diciembre. Campuzano y González- Martínez (2016) reportan en la FORSU un contenido de 175 g/kg<sub>SV</sub>, mientras que en este trabajo se obtiene un valor menor (135 g/kg<sub>SV</sub>). González *et al.* (2016) muestran valores similares a este trabajo en la fracción de papel con 214 g/kg<sub>SV</sub>. En el presente trabajo el mayor aporte de grasas a la FORSU lo dan los residuos sin clasificar (25%) y el menor el papel con 2%.



En la Figura 7.6 se puede observar la composición de cada uno de los sustratos con respecto a la distribución relativa de sus características bromatológicas. A diferencia de los datos analizados anteriormente, en esta figura se muestran los carbohidratos degradables y el total de compuestos lignocelulósicos.

Para cuantificar el contenido de carbohidratos fácilmente degradables se realizó una diferencia entre los carbohidratos totales y carbohidratos estructurales (celulosa y hemicelulosa). El mayor contenido de carbohidratos degradables lo tiene el papel con 743 g/kg<sub>SV</sub>, seguido de la FORSU y las frutas con 680 g/kg<sub>SV</sub> y 377 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente.

De acuerdo con el trabajo de Naroznova *et al.* (2016) el mayor contenido de carbohidratos degradables lo tienen los vegetales y Kobayashi *et al.* (2012) lo presenta en los residuos de cereales. En este último trabajo, vegetales presenta un valor de 284 g/kg<sub>SV</sub> de carbohidratos degradables similar al obtenido en el presente trabajo de 299 g/kg<sub>SV</sub>. El valor más bajo en el presente trabajo lo tienen los residuos de origen animal con 63 g/kg<sub>SV</sub>, similar a lo que se presenta en el trabajo de Kobayashi *et al.* (2012) donde los residuos de origen animal también presentan el valor más bajo de carbohidratos biodegradables con 60 g/kg<sub>SV</sub>. Sin embargo, Naroznova *et al.* (2016) presentan el valor más bajo en la fracción de cartón sucio con 170 g/kg<sub>SV</sub>.

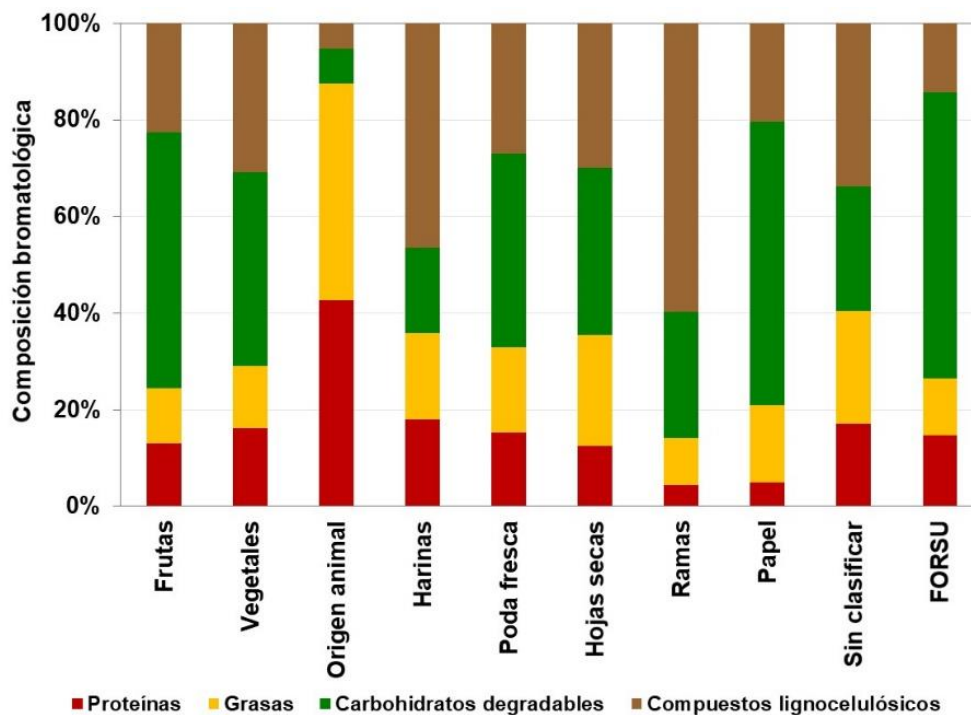


Figura 7.6. Composición bromatológica de fracciones y FORSU.

En la Figura 7.6 se puede ver también que los residuos de origen animal tienen el menor contenido de compuestos lignocelulósicos y presentan el valor más alto de proteínas y grasas, mientras que la fracción con mayor contenido de compuestos lignocelulósicos son las ramas, siendo la lignina la que está presente de manera más importante. Otra fracción con mayor



contenido de compuestos lignocelulósicos son las harinas debido a su alto contenido de hemicelulosa, como se pudo apreciar en la Tabla 7.5.

### 7.3. Potencial bioquímico de metano (PBM)

Los lodos granulares anaerobios fueron lavados antes de llevar a cabo la caracterización y la prueba de potencial bioquímico de metano (PBM), para no tener interferencias en la realización de las técnicas. En la Tabla 7.7 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los lodos anaerobios.

Tabla 7.7. Caracterización del inóculo

| Humedad (%) | Sólidos totales (g/kg) | Sólidos volátiles (g/kg) | Sólidos fijos (g/kg) | SV/ST | RIS |
|-------------|------------------------|--------------------------|----------------------|-------|-----|
| 90 ± 2.1    | 90 ± 2.5               | 73 ± 2.4                 | 18 ± 0.8             | 0.81  | 4:1 |

Todas las pruebas de potencial bioquímico de metano se realizaron por triplicado, con una duración de 21 días. En la Figura 7.7 se muestran las curvas de producción de biogás (línea continua) y metano (línea punteada) promedio obtenidas de cada uno de los componentes y la FORSU. Las curvas individuales de producción de biogás y metano de cada sustrato se presentan en los Anexos B y C.

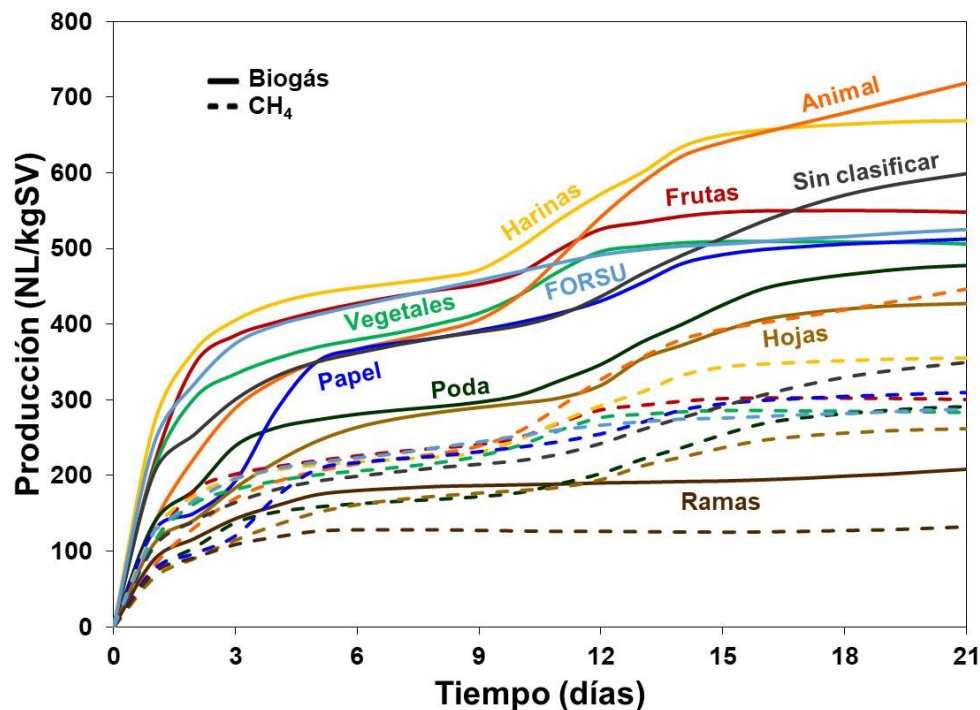


Figura 7.7. Curvas de producción de biogás y metano de fracciones y FORSU.

En la Figura 7.7 se puede ver que las fracciones con mayor producción de biogás son de los residuos de origen animal, harinas y residuos sin clasificar. Sin embargo, solo los residuos de origen animal y sin clasificar continúan en aumento hasta el día 21, que se contabilizó la producción llevada a cabo por medio de digestión anaerobia. La fracción de papel obtuvo



prácticamente la misma producción de biogás que la FORSU. Como se observa en la caracterización bromatológica la segunda fracción con mayor contenido de grasas fue el papel, lo que pudo haber influenciado en la producción de biogás, además que, probablemente, se encontraba empapado en los líquidos que se desprenden de los residuos durante su manejo y esos líquidos contienen sustancias disueltas fácilmente biodegradables. También se puede observar que la menor producción de biogás, por mucho, la consiguieron los residuos de ramas.

Muestras de biogás de los diferentes sustratos fueron analizadas por cromatografía para conocer la concentración de metano en el biogás y así calcular su producción específica de metano. Las curvas de producción específica de metano se pueden observar también en la Figura 7.7 donde se puede observar que el comportamiento de las curvas es similar al de la producción de biogás. Sin embargo, se puede ver que cada fracción tiene un comportamiento diferente. Las curvas de frutas y verduras muestran al tercer día una gran producción de metano que representa más del 60% de la generación de metano en 21 días, lo que indica que estas fracciones tienen sustancias fácilmente biodegradables.

Del día 6 al día 9 la producción de metano en todas las fracciones fue mínima, sin embargo, a partir del día 10 hubo un aumento en la producción de metano en todas las fracciones, debido a la presencia de compuestos de diferente asimilación por lo que los microorganismos consumen primero la fuente de carbono que permite un crecimiento más rápido y va disminuyendo conforme consumen este sustrato, hasta que se agota y comienzan a metabolizar otro, lo anterior ocurre con excepción de la fracción de ramas. Después del día 18 la producción de metano disminuyó con excepción de la fracción de residuos sin clasificar y origen animal, por lo que esta última sugiere que lo mejor de la FORSU para producción de metano se encuentra en los residuos de origen animal.

En la Tabla 7.8 se muestra el rendimiento de biogás y metano que alcanzó cada uno de los sustratos a los 21 días, así como el porcentaje de metano en el biogás generado por cada sustrato, también se calcularon valores de potencial bioquímico de metano teóricos (TPBM) para cada sustrato y su porcentaje de biodegradabilidad anaerobia.

La producción teórica de  $\text{CH}_4$  (TPBM) de cada componente, se calculó utilizando la ecuación estequiométrica de Symons y Buswell (1933) (ecuación 1, capítulo 4.2) en  $\text{NLCH}_4/\text{kg}_{\text{SV}}$  y la biodegradabilidad anaerobia se calculó utilizando la ecuación 2, capítulo 4.2. De acuerdo con Triolo *et al.* (2012) El TPBM no se utiliza como un indicador del potencial de producción de metano, pero sí como un criterio para evaluar la biodegradabilidad del sustrato mediante la relación que se establece en la ecuación 2.

La biodegradabilidad anaerobia de las fracciones se calculó como relación entre PBM y TPBM (Tabla 6.8), por lo que fue posible subdividir la FORSU en grupos con biodegradabilidad anaerobia alta y baja, relacionado con el contenido de lignina y la cristalinidad de la celulosa en la biomasa: Origen animal (70%), vegetales (71%), sin clasificar (72%), frutas (84%) y harinas (95%) tienen una alta biodegradabilidad anaerobia, mientras que ramas (22%), papel (47%), poda fresca y hojas secas (61%) tienen una biodegradabilidad baja.

La Tabla 7.8 muestra que el mayor PBM obtenido en las pruebas de laboratorio con un 62% de metano en el biogás generado lo tienen los residuos de origen animal con  $477 \text{ NL}/\text{kg}_{\text{SV}}$ ; esta fracción aporta a la FORSU  $36 \text{ NL}/\text{kg}_{\text{SV}}$  de metano y, de acuerdo con lo que se indica en la Tabla 6.8, logró una degradabilidad alta. Como valor por arriba de la media se encuentran los residuos de papel que alcanzaron una producción de metano de  $310 \text{ NL}/\text{kg}_{\text{SV}}$ , con el 60%



de metano generado, un porcentaje de degradabilidad baja y un aporte de metano a la FORSU únicamente de 6 NL/kg<sub>sv</sub>. El PBM más bajo (133 NL/Kg<sub>sv</sub>) así como el porcentaje de degradabilidad más bajo (22%) lo tienen los residuos de ramas y solo aportaron 5 CH<sub>4</sub>NL/kg<sub>sv</sub> a la FORSU.

**Tabla 7.8.** Producción de biogás y metano durante la prueba de PBM

| Fracción       | Biogás NL/kg <sub>sv</sub> | CH <sub>4</sub> en biogás % | PBM NLCH <sub>4</sub> /kg <sub>sv</sub> | CH <sub>4</sub> por fracción NL/kg <sub>sv</sub> | TPBM NLCH <sub>4</sub> /kg <sub>sv</sub> | Degradabilidad anaerobia (%) |
|----------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|--|------------------------------|
| Frutas         | 548                        | 55                          | 301                                     | 108  | 361                                      | 84                           |
| Vegetales      | 506                        | 56                          | 283                                     | 37   | 397                                      | 71                           |
| Origen animal  | 719                        | 62                          | 447                                     | 36   | 641                                      | 70                           |
| Harinas        | 669                        | 53                          | 355                                     | 10   | 375                                      | 95                           |
| Poda fresca    | 478                        | 61                          | 291                                     | 17   | 477                                      | 61                           |
| Hojas secas    | 427                        | 61                          | 261                                     | 18   | 425                                      | 61                           |
| Ramas          | 208                        | 64                          | 133                                     | 5  | 599                                      | 22                           |
| Papel          | 512                        | 60                          | 310                                     | 6  | 662                                      | 47                           |
| Sin clasificar | 599                        | 58                          | 350                                     | 70   | 489                                      | 72                           |
| FORSU          | 525                        | 55                          | 288                                     | 308  | 586                                      | 49                           |

### 7.3.1. Influencia de los compuestos lignocelulósicos sobre la biodegradabilidad

La influencia de los compuestos lignocelulósicos sobre la biodegradabilidad de los principales componentes que conforman la FORSU se realizó mediante el cálculo del potencial bioquímico de metano teórico (TPBM), TPBM sin compuestos lignocelulósicos (TPBM<sub>SCL</sub>) considerando únicamente: carbohidratos degradables, proteínas y lípidos (ecuación 3) y TPBM de compuestos lignocelulósicos (TPBM<sub>CL</sub>): celulosa, hemicelulosa y lignina (ecuación 4).

$$TPBM_{SCL} = (\text{lípidos} \cdot 1014 + \text{proteínas} \cdot 496 + \text{carbohidratos degradables} \cdot 415) \cdot 0.001 \quad (3)$$

$$TPBM_{CL} = TPBM - TPBM_{SCL} \quad (4)$$

En la Figura 7.8 es posible ver el TPBM que resulta de tomar en cuenta carbohidratos totales, proteínas, lípidos y lignina, es decir, comprende TPBM<sub>SCL</sub> y TPBM<sub>CL</sub>, los cuales también se muestran en la gráfica al igual que el PBM experimental de cada fracción, obtenido a los 21 de digestión anaerobia en un rango de temperatura mesofílico.

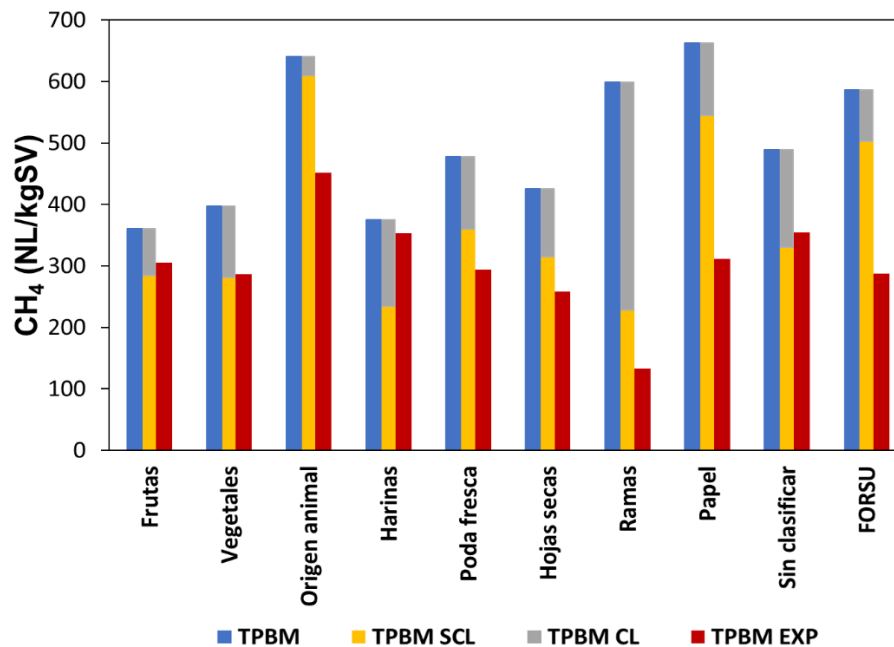
La gráfica muestra en todas las fracciones que el TPBM es considerablemente mayor que el PBM experimental. Lo anterior ocurre debido a que el valor calculado de TPBM estima que toda la biomasa estará fácilmente disponible para los microorganismos. Sin embargo, en la práctica esto no sucede ya que la estructura molecular no considera la complejidad de las moléculas y su recalcitrancia, gran parte del carbono que presentan no es fácilmente accesible, razón por la cual el PBM obtenido en el laboratorio es menor.

El TPBM<sub>SCL</sub> de frutas, vegetales, harinas y residuos sin clasificar es similar o menor que el PBM obtenido en laboratorio y mayor en el caso de los residuos de poda fresca, hojas secas, ramas, papel y FORSU.



Por lo tanto, en el caso de los vegetales se puede inferir que la conversión a metano de componentes orgánicos se realizó a partir de compuestos fácilmente degradables (carbohidratos degradables, proteínas y lípidos). Ya que el valor calculado de  $TPBM_{SCL}$  es prácticamente igual al obtenido experimentalmente; mientras que en frutas, harinas y residuos sin clasificar se asume que una parte de los compuestos lignocelulósicos se lograron degradar debido a que el PBM obtenido de las pruebas de laboratorio abarca el valor calculado de  $TPBM_{SCL}$  y todavía logra cubrir parte del  $TPBM_{CL}$ . Lo que podría indicar que más compuestos lignocelulósicos se transformaron a metano debido a un grado menor de lignificación y probablemente también a una menor cristalinidad de la celulosa.

Sin embargo, en las fracciones de residuos de vegetación (poda, hojas secas y ramas) no ocurrió lo mismo ya que el valor de PBM obtenido en laboratorio es menor que el  $TPBM_{SCL}$ , por lo que se infiere que hubo una incompleta degradación de carbohidratos degradables, proteínas y/o lípidos y no se consiguió degradar compuestos lignocelulósicos. Los residuos de origen animal, al ser la fracción con menor contenido de compuestos lignocelulósicos y mayor contenido de proteínas y grasas, se infiere que estas últimas no lograron una degradación completa, probablemente por el tiempo de duración de la prueba.



**Figura 7.8.** TPBM (potencial bioquímico de metano teórico),  $TPBM_{SCL}$  (potencial bioquímico de metano sin compuestos lignocelulósicos),  $TPBM_{CL}$  (potencial bioquímico de metano de compuestos lignocelulósicos),  $PBM_{EXP}$  (potencial bioquímico de metano experimental) de la FORSU y sus fracciones.

A pesar de que comúnmente se etiquetan a los compuestos lignocelulósicos como de baja degradabilidad, los componentes individuales de celulosa y hemicelulosa se pueden degradar en condiciones anaerobias y, por el contrario, la lignina no (Paul y Dutta, 2018). Cuando los componentes mencionados están estrechamente ligados a la lignina se vuelven inaccesibles para los microorganismos y por lo tanto no son degradables.

En la Figura 7.9 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización bromatológica y el rendimiento de producción de metano, lo cual permite tener un análisis más completo de las





fracciones que componen la FORSU. Los sustratos están ordenados de acuerdo con su contenido de compuestos lignocelulósicos (menor a mayor):

- **Origen animal:** es la fracción que presenta el menor contenido de compuestos lignocelulósicos, el mayor contenido de grasas y proteínas, por lo que consigue la mayor producción de metano.
- **Frutas:** tiene un bajo contenido de compuestos lignocelulósicos, pero más significativo que el que presenta la fracción anterior al ser más de tres veces mayor con 160 g/kg<sub>SV</sub>. Tiene la tercera mayor composición de carbohidratos degradables y su contenido de grasas y proteína es bajo, por lo que consigue una menor producción de metano.
- **FORSU** presenta un contenido de compuestos lignocelulósicos de 163 g/kg<sub>SV</sub> casi igual al de las frutas; sin embargo, presenta un mayor contenido de lignina (52 g/kg<sub>SV</sub>) lo que posiblemente ocasionó que los demás compuestos lignocelulósicos estuvieran estrechamente ligados a la lignina y se volvieran inaccesibles a los microorganismos y por lo tanto no degradables. A pesar de tener un importante contenido de carbohidratos degradables y la segunda mayor composición de proteínas, su producción de metano fue menor.

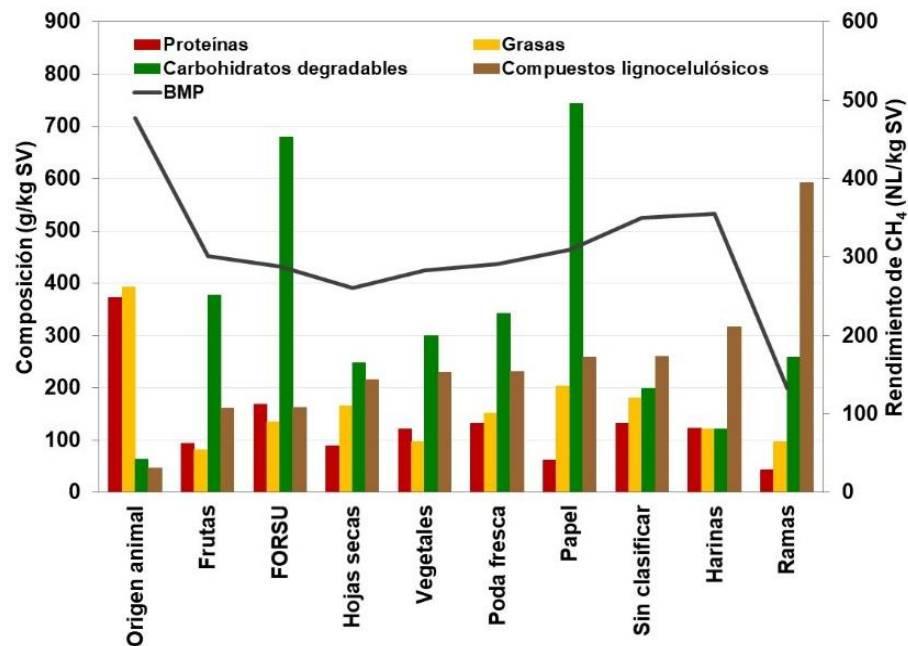


Figura 7.9. Caracterización bromatológica y PBM de fracciones y FORSU

- **Hojas secas:** presentan un mayor contenido de hemicelulosa y lignina, 49 y 68 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente, en comparación con las fracciones anteriores. Sin embargo, al tener la tercera mayor composición de grasas, que se debió a las hojas de maíz que envuelven los tamales que comúnmente se consumen en la Ciudad de México, su producción de metano disminuye, pero no tanto como se esperaba.
- **Vegetales:** presentan un menor contenido de lignina que la fracción anterior, sin embargo, un mayor contenido de celulosa y hemicelulosa, 102 y 63 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente, así como un contenido de proteínas y carbohidratos degradables superior a la media con 121 y 299 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. Al no estar tan ligada la lignina con los demás compuestos lignocelulósicos, logró degradarse la hemicelulosa durante la digestión anaerobia y conseguir un potencial de metano mayor (283 NL/kg<sub>SV</sub>).



- **Poda fresca:** tiene un mayor contenido de celulosa y lignina que la fracción anterior, 111 y 69 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. Sin embargo, presenta un menor contenido de hemicelulosa y cuenta con la tercera mayor composición de proteínas y con un contenido de grasas mayor a la media, por lo que consigue una producción de metano ligeramente mayor de 291 NL/kg<sub>SV</sub>.
- **Papel:** tiene el contenido de celulosa más alto (207 g/kg<sub>SV</sub>), el contenido de lignina más bajo (32 g/kg<sub>SV</sub>), la mayor composición de carbohidratos degradables y el segundo mayor contenido de grasas (203 g/kg<sub>SV</sub>) y alcanza un rendimiento de metano de 310 NL/kg<sub>SV</sub>.
- **Sin clasificar:** presentan uno de los mayores contenidos de fibras lignocelulósicas, siendo la lignina la que se encuentra en mayor cantidad (165 g/kg<sub>SV</sub>) y un contenido de carbohidratos degradables menor a la media. Tiene el tercer mayor contenido de grasas y proteínas, por lo que a pesar de tener una composición importante de fibras y, al ser esta fracción una masa de pequeños restos de todas las fracciones anteriores, lograron degradarse muchas de estas y obtener uno de los rendimientos de metano más altos.
- **Harinas:** cuentan con un elevado contenido de material lignocelulósico, siendo la hemicelulosa la que tiene mayor presencia con 232 g/kg<sub>SV</sub>. Las demás características bromatológicas analizadas se encuentran prácticamente en la misma proporción (grasas, proteínas y carbohidratos degradables). Al no utilizar amilasa en la técnica para determinar fibras, en específico con detergente neutro, no fue posible eliminar el almidón de los residuos de harinas, por lo que posiblemente lo que se detecta como hemicelulosa esté siendo afectado por el almidón justificando así su elevada producción de metano a pesar del contenido de fibras que presenta.
- **Ramas:** cuentan con el mayor contenido de compuestos lignocelulósicos siendo la lignina la que se presenta en mayor cantidad con 401 g/kg<sub>SV</sub>. También cuenta con el menor contenido de proteínas y grasas y un contenido de carbohidratos degradables menor a la media, por lo que consigue la menor producción de biogás con 133 NL/kg<sub>SV</sub>.

#### 7.4. Sustratos de referencia

Los sustratos de referencia seleccionados fueron: uvas verdes sin semillas, cáscara de naranja, cáscara de plátano, zanahoria, tortillas, pasto fresco, hojas secas de fresno y servilletas de papel. En la Figura 7.10 se muestran las principales razones por las que se eligieron estos sustratos, siendo las siguientes: se identificaron como residuos generados en la Ciudad de México al realizar la separación de fracciones, los resultados obtenidos en las etapas anteriores (caracterización y PBM), utilización de sustratos como testigos a partir de muestras limpias, su importante consumo en México ya sea porque forman parte de la dieta del mexicano promedio o porque se trate de árboles y residuos de poda más comunes en la Ciudad de México. Por último, otros factores que influenciaron la selección de los sustratos fue su disponibilidad durante del año y su contenido de fibras lignocelulósicas.

##### 7.4.1 Sólidos totales, volátiles, fijos y humedad

Los sustratos analizados en esta etapa son sustratos “limpios”, por lo que no se vieron afectados por restos de la FORSU. En la Tabla 7.9 se puede observar que las diferencias de humedad entre los sustratos de referencia seleccionados son grandes, van desde el papel como el sustrato con menor contenido de humedad (5%) hasta la zanahoria con 88% de humedad, característica otorgada por el alto contenido de agua de vegetales y frutas. La mayor relación SV/ST la tienen las servilletas con 0.99 y la menor las hojas de fresno con 0.80.



**Figura 7.10.** Elección de sustratos de referencia

Comparando los sustratos de referencia con las fracciones (Figura 7.11) es posible ver que en el caso de la fracción de frutas el contenido de humedad (Figura 7.11a) es igual al de la cáscara de naranja, pero menor que el de la cáscara de plátano y uvas verdes, que tienen 87 y 84%, respectivamente. Esto último, también ocurrió con la fracción de vegetales y poda fresca. Sin embargo, en el caso de la fracción de hojas secas y papel se ve lo contrario ya que sus humedades son de 64 y 69%, respectivamente, y las humedades de sus sustratos de referencia van del 5 al 16%. Por lo tanto, es posible ver que la humedad de estas fracciones se debe a la influencia de restos de otras fracciones y a la capacidad del sustrato de absorber los lixiviados generados.

**Tabla 7.9.** Contenido de humedad, sólidos y relación SV/ST de los sustratos de referencia. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Sustrato              | Humedad (%)  | Sólidos totales (g/kg) | Sólidos volátiles (g/kg) | Sólidos fijos (g/kg) | SV/ST |
|-----------------------|--------------|------------------------|--------------------------|----------------------|-------|
| Cáscara de naranja    | 77 ± 0.1 (3) | 231 ± 1.0              | 222 ± 2.7                | 9 ± 0.5              | 0.96  |
| Cáscara de plátano    | 87 ± 0.1 (3) | 125 ± 0.6              | 108 ± 0.7                | 17 ± 0.1             | 0.86  |
| Uvas verdes           | 84 ± 0.1 (3) | 162 ± 0.8              | 153 ± 3.4                | 9 ± 3.8              | 0.94  |
| Zanahoria             | 88 ± 0.1 (3) | 118 ± 0.6              | 110 ± 1.1                | 8 ± 0.4              | 0.94  |
| Tortillas             | 51 ± 0.3 (3) | 492 ± 3.5              | 466 ± 1.5                | 27 ± 1.4             | 0.95  |
| Pasto fresco          | 75 ± 0.1 (3) | 252 ± 0.5              | 220 ± 0.9                | 32 ± 0.3             | 0.87  |
| Hojas secas de fresno | 16 ± 0.1 (3) | 843 ± 0.3              | 674 ± 5.6                | 169 ± 5.9            | 0.80  |
| Servilleta de papel   | 5 ± 0.2 (3)  | 952 ± 3.7              | 941 ± 1.8                | 11 ± 0.5             | 0.99  |

La Figura 7.11b muestra las diferencias de sólidos volátiles entre fracciones de FORSU y sustratos de referencia. Los sustratos que presentan mayor diferencia nuevamente son las servilletas y hojas secas de fresno. Las servilletas tienen el mayor contenido de sólidos volátiles (941 NL/kg<sub>SV</sub>), seguidas de las hojas secas de fresno (674 g/kg<sub>SV</sub>), por lo que se puede concluir que dentro de la materia orgánica contenida en las muestras se encuentra un importante contenido fibras.

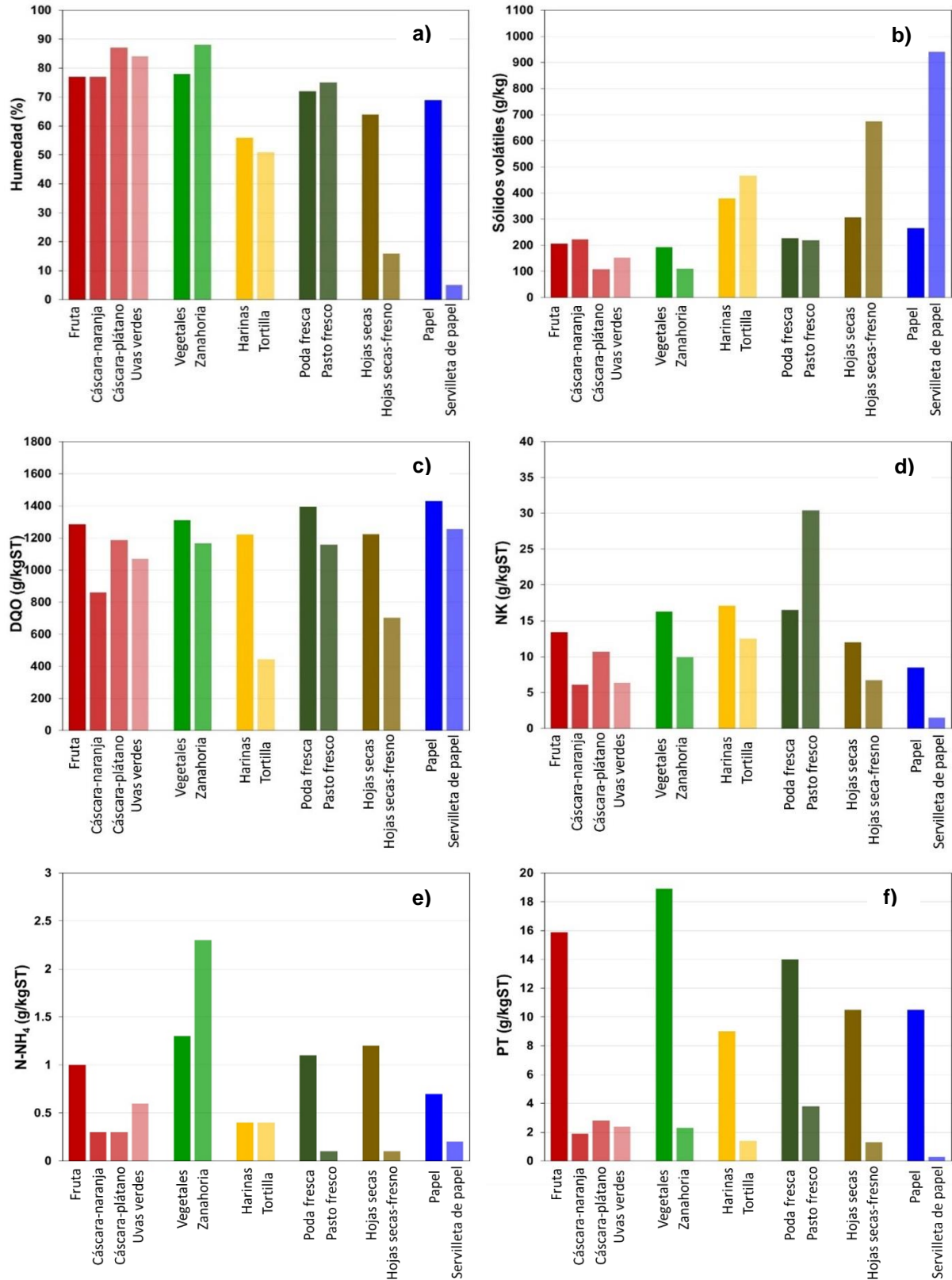


Figura 7.11. Comparación de fracciones con sustratos de referencia: a) humedad, b) sólidos volátiles, c) demanda química de oxígeno, d) nitrógeno Kjeldahl, e) nitrógeno amoniacal y f) fósforo total.



#### 7.4.2. Demanda química de oxígeno, nitrógeno y fósforo total

La DQO obtenida de los sustratos de referencia se encuentra en la Tabla 7.10, donde se puede observar que la mayor DQO la tienen las servilletas y la menor las tortillas con 1,256 y 443 g/kg<sub>ST</sub>, respectivamente. La mayor relación DQO/SV la tiene la cáscara de plátano con 1.37 y la menor las tortillas con 0.47.

**Tabla 7.10.** Demanda química de oxígeno, relación DQO/SV y DQO/ST de los sustratos de referencia. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Sustrato              | DQO (g/kg <sub>ST</sub> ) | DQO/SV | DQO/ST |
|-----------------------|---------------------------|--------|--------|
| Cáscara de naranja    | 859 ± 40.4 (7)            | 0.89   | 0.86   |
| Cáscara de plátano    | 1186 ± 61.4 (7)           | 1.37   | 1.18   |
| Uvas verdes           | 1068 ± 53.3 (7)           | 1.13   | 1.07   |
| Zanahoria             | 1166 ± 73.1 (7)           | 1.25   | 1.17   |
| Tortillas             | 443 ± 24.1 (7)            | 0.47   | 0.44   |
| Pasto fresco          | 1159 ± 66.8 (7)           | 1.33   | 1.16   |
| Hojas secas de fresno | 703 ± 44.4 (7)            | 0.88   | 0.70   |
| Servilletas de papel  | 1256 ± 67.3 (7)           | 1.27   | 1.26   |

En la Figura 7.11c se hace una comparación de la demanda química de oxígeno obtenida de las fracciones y los sustratos de referencia, donde se puede ver todas las fracciones presentan una mayor DQO con respecto a su sustrato de referencia. Sin embargo, hay una mayor diferencia entre la fracción de harinas y las tortillas como sustrato de referencia, lo cual se puede deber al tipo de maíz y al proceso de elaboración. En la Tabla 7.11 se pueden ver los resultados de NK, NH<sub>4</sub> y PT, los cuales se comparan cada uno por separado en las gráficas anteriores (Figura 7.11d a e).

**Tabla 7.11.** Nutrientes: nitrógeno y fósforo de los sustratos de referencia. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Sustrato              | NK (g/kg <sub>ST</sub> ) | N-NH <sub>4</sub> (g/kg <sub>ST</sub> ) | PT (g/kg <sub>ST</sub> ) |
|-----------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| Cáscara de naranja    | 6.1 ± 0.29 (3)           | 0.3 ± 0.02 (3)                          | 1.9 ± 0.11 (7)           |
| Cáscara de plátano    | 10.7 ± 0.48 (3)          | 0.3 ± 0.05 (3)                          | 2.8 ± 0.31 (7)           |
| Uvas verdes           | 6.4 ± 0.23 (3)           | 0.6 ± 0.04 (3)                          | 2.4 ± 0.31 (7)           |
| Zanahoria             | 9.9 ± 0.24 (3)           | 2.3 ± 0.18 (3)                          | 8.7 ± 0.31 (7)           |
| Tortillas             | 12.5 ± 0.57 (3)          | 0.4 ± 0.06 (3)                          | 1.4 ± 0.09 (7)           |
| Pasto fresco          | 30.4 ± 1.04 (3)          | 0.1 ± 0.01 (3)                          | 3.8 ± 0.10 (7)           |
| Hojas secas de fresno | 6.7 ± 0.35 (3)           | 0.1 ± 0.01 (3)                          | 1.3 ± 0.06 (7)           |
| Servilletas de papel  | 1.5 ± 0.09 (7)           | 0.2 ± 0.03 (3)                          | 0.3 ± 0.02 (7)           |

En el caso del nitrógeno Kjeldahl, se puede ver en la Figura 7.11d que todas las fracciones presentan un mayor contenido de NK en comparación con su sustrato de referencia. Con excepción de la fracción de poda fresca la cual es casi la mitad de lo que presenta el pasto (30.4 g/kg<sub>ST</sub>). La etapa de crecimiento es un factor que influye en las características de este tipo de sustrato, de acuerdo con Sinbuathong *et al.* (2016), el pasto con un intervalo de corte menor presenta el mayor contenido de nitrógeno, por lo que debido a que el pasto es bastante alto en sustrato orgánico, se esperaría tener un buen potencial de generación de biogás a partir de este sustrato.

En la Figura 7.11e se presenta el contenido de nitrógeno amoniacal en fracciones y sustratos. En prácticamente todas las fracciones el contenido de nitrógeno amoniacal es mayor o igual con respecto a sus sustratos. Sin embargo, la fracción de vegetales presenta un menor



contenido ( $1.3 \text{ g/kg}_{\text{ST}}$ ) con respecto a la zanahoria, la cual presenta  $2.3 \text{ g/kg}_{\text{ST}}$ . Esto se debe a que la deficiencia de nitrógeno en la zanahoria causa un crecimiento lento y restringido, raíces pequeñas, tallos finos, erectos, duros y maduración retardada. Por lo tanto, es común que se utilicen fertilizantes para evitar esto: al estar la zanahoria en contacto directo con la tierra, el contenido de nitrógeno aumenta.

En la Figura 7.11f se muestra el contenido de fósforo total de fracciones y sustratos, es posible ver que todas las fracciones, sin excepción, presentan por mucho un contenido de fósforo mayor que el de sus sustratos, lo cual se puede deber a la impregnación que tienen las fracciones con residuos de la FORSU.

### 7.4.3. Caracterización bromatológica

#### 7.4.3.1 Fibras

Dentro de la cuarta etapa de este trabajo se llevaron a cabo también análisis bromatológicos de los sustratos de referencia. Los análisis de fibras de los sustratos de referencia seleccionados se realizaron por triplicado, nuevamente por la técnica de detergentes con la finalidad de que los resultados fueran comparativos (sin realizar ninguna modificación a la técnica entre sustratos). La Tabla 7.12 muestra el contenido de compuestos lignocelulósicos de cada uno de los sustratos, donde se puede ver que el mayor contenido de fibras lignocelulósicas lo tienen las servilletas con  $806 \text{ g/kg}_{\text{SV}}$ , siendo la celulosa la que se encuentra en mayor proporción, mientras que el menor contenido lo tiene la zanahoria con solo  $60 \text{ g/kg}_{\text{SV}}$ .

**Tabla 7.12.** Compuestos lignocelulósicos de los sustratos de referencia ( $\text{g/kg}_{\text{SV}}$ ).

| Sustrato              | Celulosa | Hemicelulosa | Lignina |
|-----------------------|----------|--------------|---------|
| Cáscara de naranja    | 25       | 18           | 93      |
| Cáscara de plátano    | 56       | 12           | 7       |
| Uvas verdes           | 20       | 123          | 166     |
| Zanahoria             | 48       | 2            | 10      |
| Tortillas             | 29       | 461          | 4       |
| Pasto fresco          | 128      | 188          | 20      |
| Hojas secas de fresno | 39       | 150          | 336     |
| Servilletas de papel  | 678      | 101          | 27      |

Las uvas verdes presentan un contenido de lignina mayor ( $166 \text{ g/kg}_{\text{SV}}$ ) que el esperado. Esto se puede deber al alto contenido de azúcares presentes en los sustratos, los cuales no fueron eliminados durante la hidrólisis con ácido al 72%, por lo que para este tipo de sustratos se recomienda una modificación en la técnica donde se realice un aumento en la temperatura para asegurar la eliminación de azúcares.

En la Figura 7.12a se puede observar el contenido de celulosa de las fracciones y sustratos. El mayor contenido de celulosa lo tienen las servilletas con  $678 \text{ g/kg}_{\text{SV}}$ . Incluso es más de tres veces mayor que el contenido de celulosa que presenta la fracción de papel que está integrada en su mayoría por servilletas (>90%). El menor contenido de celulosa lo tienen las uvas verdes con  $20 \text{ g/kg}_{\text{SV}}$ , el cual, también y por mucho, es menor que su fracción de frutas, la cual tiene 6 veces el contenido de celulosa.

La Figura 7.12b muestra el contenido de hemicelulosa, de fracciones y sustratos en la cual se puede observar una composición variable en todas las fracciones. La mayoría de las frutas tienen un contenido de hemicelulosa bajo ( $7\text{-}18 \text{ g/kg}_{\text{SV}}$ ). Sin embargo, las uvas presentan un

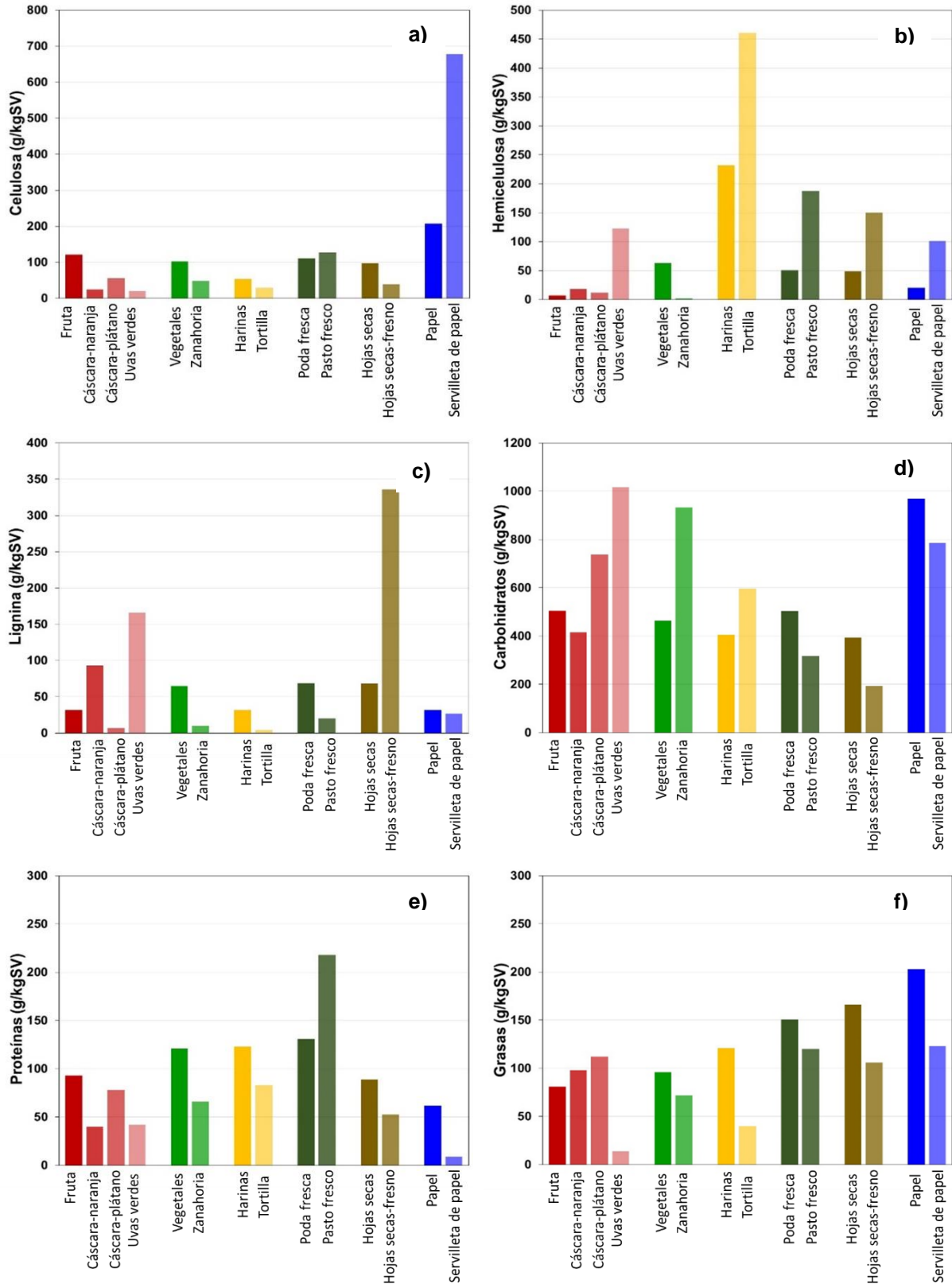


Figura 7.12. Comparación de fracciones con sustratos de referencia: a) celulosa, b) hemicelulosa, c) lignina, d) carbohidratos totales, e) proteínas y f) grasas.



Sin embargo, las uvas presentan un contenido mayor, 123g/kg<sub>SV</sub> probablemente por una interferencia por el alto contenido de azúcares. En el caso de los vegetales, la fracción presenta un mayor contenido de hemicelulosa, en comparación con la zanahoria. Esto se puede deber a la mezcla de vegetales que se encontraron durante la separación, en especial a las cáscaras.

Las harinas y tortillas presentan los contenidos de hemicelulosa más altos, siendo aún mayor el contenido de hemicelulosa del sustrato limpio “tortillas”, 461 g/kg<sub>SV</sub>, prácticamente 2 veces mayor que el contenido en la fracción. En el caso de la poda fresca y pasto, así como hojas secas-hojas secas de fresno y papel-servilletas, sucede algo similar ya que estos sustratos de referencia presentan un mayor contenido de hemicelulosa con 188, 150 y 101 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente, lo cual se puede deber a que las fracciones, al tener mayor humedad y al estar mezcladas, lograron solubilizar hemicelulosa, la cual es, de los compuestos lignocelulósicos, el más accesible para los microorganismos por su estructura amorfa.

Por último, en cuanto a fibras, la Figura 7.12c muestra el contenido de lignina en los diferentes sustratos. En cuanto a las frutas, el mayor contenido de lignina obtenido por la técnica de detergente ácido y ácido al 72% se encontró en las uvas, seguido de la cáscara de naranja, con 166 y 93 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. Los vegetales, harinas, poda y papel presentan mayor contenido de lignina que sus sustratos de referencia debido a la variedad de componentes que integran cada fracción o por restos de estos que se quedaron adheridos. En el caso de las hojas secas de fresno es posible ver que su contenido de lignina es 5 veces mayor que el de la fracción de hojas secas, ya que, si bien las hojas secas de fresno se identificaron dentro de la fracción de hojas secas, no fueron las únicas, pero posiblemente si las que aportaron más lignina a esta fracción.

#### 7.4.3.2 Carbohidratos, proteínas y grasas

Los resultados obtenidos de carbohidratos, proteínas y grasas se presentan en la Tabla 7.13 donde se puede observar que el mayor contenido de carbohidratos lo tienen las uvas y zanahoria con 1,016 y 933 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente. El menor contenido lo tienen las hojas secas de fresno con 193 g/kg<sub>SV</sub>.

**Tabla 7.13.** Carbohidratos, proteínas y grasas de los sustratos de referencia. Entre paréntesis se indica el número de repeticiones.

| Sustrato              | Carbohidratos<br>(g/kg <sub>SV</sub> ) | Proteínas<br>(g/kg <sub>SV</sub> ) | Grasas<br>(g/kg <sub>SV</sub> ) |
|-----------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Cáscara de naranja    | 415 ± 22.4 (3)                         | 40 ± 2.1 (3)                       | 98 ± 3.8 (3)                    |
| Cáscara de plátano    | 737 ± 36.8 (3)                         | 78 ± 3.5 (3)                       | 112 ± 6.1 (3)                   |
| Uvas verdes           | 1016 ± 52.9 (3)                        | 42 ± 1.7 (3)                       | 14 ± 0.8 (3)                    |
| Zanahoria             | 933 ± 51.3(3)                          | 66 ± 1.6 (3)                       | 72 ± 3.7 (3)                    |
| Tortillas             | 596 ± 35.5 (3)                         | 83 ± 3.7 (3)                       | 40 ± 2.1 (3)                    |
| Pasto fresco          | 317 ± 15.9 (3)                         | 218 ± 7.5 (3)                      | 120 ± 6.2 (3)                   |
| Hojas secas de fresno | 193 ± 9.9 (3)                          | 53 ± 3.1 (3)                       | 106 ± 7.8 (3)                   |
| Servilletas de papel  | 785 ± 43.4 (3)                         | 9 ± 0.5(3)                         | 123 ± 1.8 (3)                   |

El pasto cuenta con un mayor contenido de proteínas (218 g/kg<sub>SV</sub>) y el menor lo presentan las servilletas con 9 g/kg<sub>SV</sub>. El mayor contenido de grasas lo presentan las servilletas; posiblemente, al momento de manipularlo para reducir el tamaño de partícula, haya sido capaz





de absorber y conseguir 123 g/kg<sub>SV</sub>, mientras que el menor contenido lo tienen las tortillas con 40 g/kg<sub>SV</sub>.

Los valores obtenidos de carbohidratos se muestran en la Figura 7.12d, donde es posible ver que sustratos como cáscara de plátano, uvas verdes, zanahoria y tortillas tienen un mayor contenido de carbohidratos con respecto a sus fracciones, tratándose de carbohidratos fácilmente degradables, mientras que las fracciones restantes tienen un mayor contenido de carbohidratos que sus fracciones.

En la Figura 7.12e de forma general se puede ver un mayor contenido de proteínas en las fracciones que en los sustratos. Sin embargo, con la poda fresca sucede lo contrario ya que el pasto tiene un mayor contenido de proteínas (218 g/kg<sub>SV</sub>) debido a su alto contenido de nitrógeno orgánico.

La Figura 7.12f muestra el contenido de grasas de los diferentes sustratos analizados, en donde es posible ver que la mayoría de las fracciones presentan un alto contenido de grasas y aceites con respecto a los sustratos de referencia. En el caso de las frutas, en específico las uvas verdes, se ve que tienen un bajo contenido en grasas (14 g/kg<sub>SV</sub>) con respecto a la fracción frutas, mientras que la cáscara de naranja y la cáscara de plátano presentan un mayor contenido de grasas que la fracción de frutas, probablemente debido a que la técnica que se utiliza para determinar grasas y aceites es una técnica extractiva y se pudieron haber extraído aceites esenciales.

En la Figura 7.13 es posible observar la composición bromatológica completa de los sustratos de referencia, en la que se incluyen proteínas, grasas, carbohidratos fácilmente degradables y compuestos lignocelulósicos. Se observa que el mayor contenido de carbohidratos degradables lo tienen las zanahorias y las uvas verdes. Los sustratos con bajo contenido de carbohidratos degradables son el pasto, las hojas secas de fresno y las servilletas con 1, 4 y 6 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente.

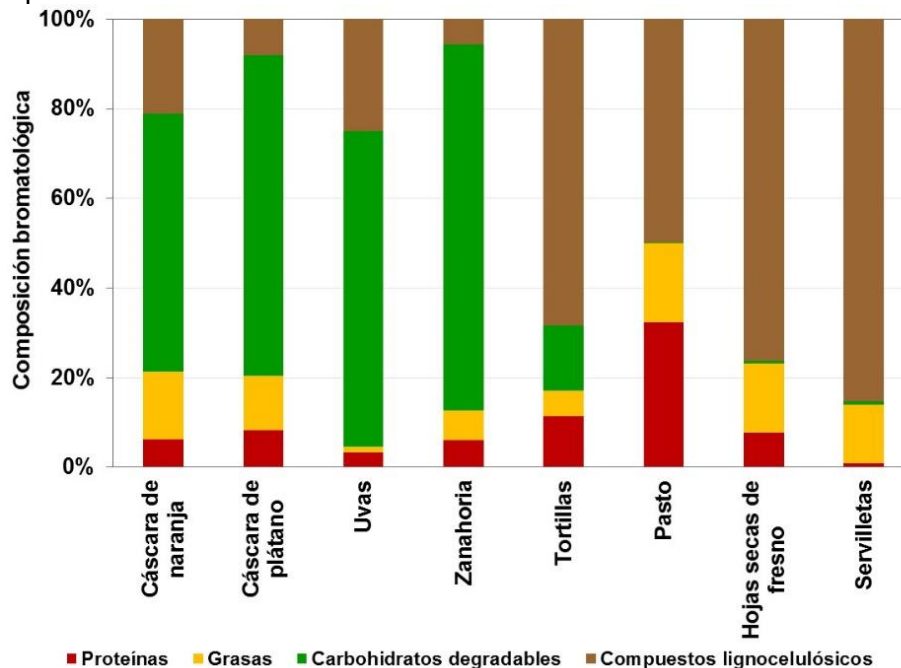


Figura 7.13. Caracterización bromatológica de los sustratos de referencia.



Debido a una posible interferencia en la técnica al no realizarse la eliminación de almidón mediante amilasa, las tortillas presentan un bajo contenido de carbohidratos degradables. Lo anterior se realizó con la finalidad de poder comparar resultados al utilizar el mismo método para todas las muestras.

Los sustratos con mayor contenido de compuestos lignocelulósicos son las servilletas y las hojas secas de fresno, mientras que los valores más bajos se encuentran en la zanahoria y la cáscara de plátano.

#### 7.4.4. Potencial bioquímico de metano (PBM)

Las pruebas de PBM se realizaron por triplicado a cada sustrato. En la Figura 7.14a se puede ver que el comportamiento de las curvas de producción de biogás en frutas es similar en el caso de la cáscara de naranja y la fracción de frutas. Al tercer día ambas alcanzan una producción de biogás que corresponde a más del 60% del generado en 21 días. En el caso de las uvas la producción de biogás en los primeros días es más lenta hasta el día 6 que alcanza el 60% del biogás total generado. Del día 8 al 11 los tres sustratos mencionados anteriormente tienen un comportamiento diáuxico, ya que se ve una segunda fase de crecimiento en la producción de biogás. Las uvas tienen más marcado este comportamiento. Sin embargo, al día 21 alcanzan un rendimiento similar: cáscara de naranja 581 NL/kg<sub>SV</sub>, uvas 562 NL/kg<sub>SV</sub> y frutas 548 NL/kg<sub>SV</sub>.

En el caso de la cáscara de plátano, al día 3 obtiene el 75% de la producción de biogás registrada a los 21 días y, durante los siguientes días, el aumento en la producción es mínimo, alcanzando un rendimiento de 382 NL/kg<sub>SV</sub>.

La Figura 7.14b muestra la producción de metano de los sustratos de frutas. La cáscara de plátano, naranja y fracción de frutas al tercer día alcanzan una producción de metano mayor al 65% del generado en 21 días. En el caso de las uvas verdes, estas alcanzan hasta el día 8 un 60% del metano total generado durante la digestión anaerobia. También es posible ver que, al inicio, la producción de metano de la cáscara de naranja es menor en comparación que los demás sustratos: A los 21 días alcanza la producción de metano más alta con 332 NL/kg<sub>SV</sub>, 11% mayor del obtenido en la fracción de frutas.

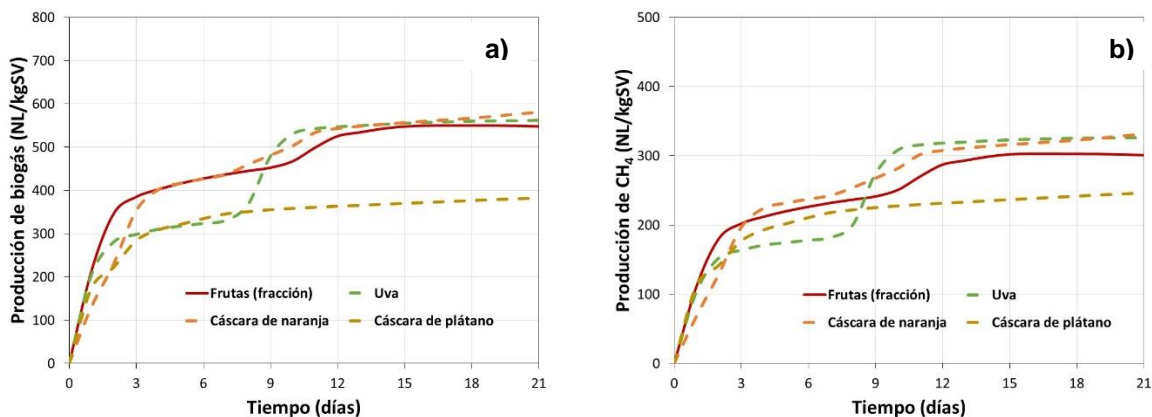
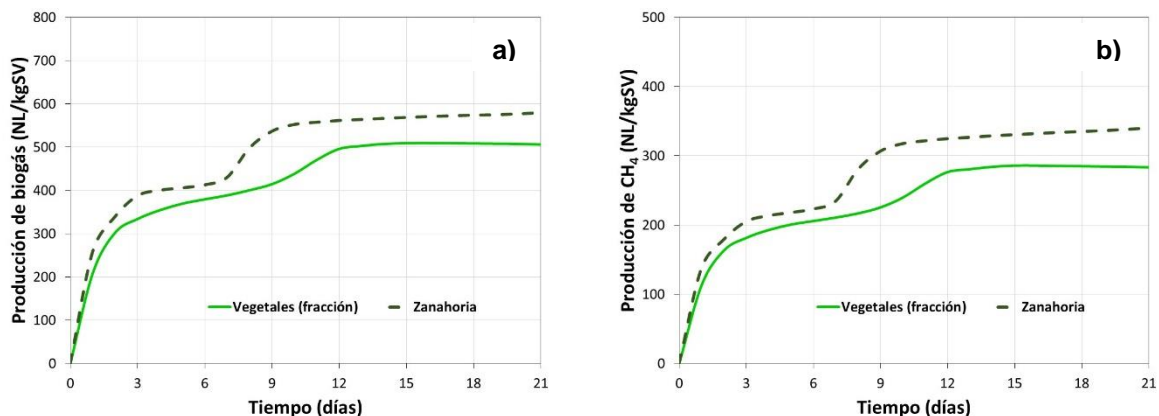


Figura 7.14. Producción de a) biogás y b) metano de fracción de frutas y sustratos de referencia.



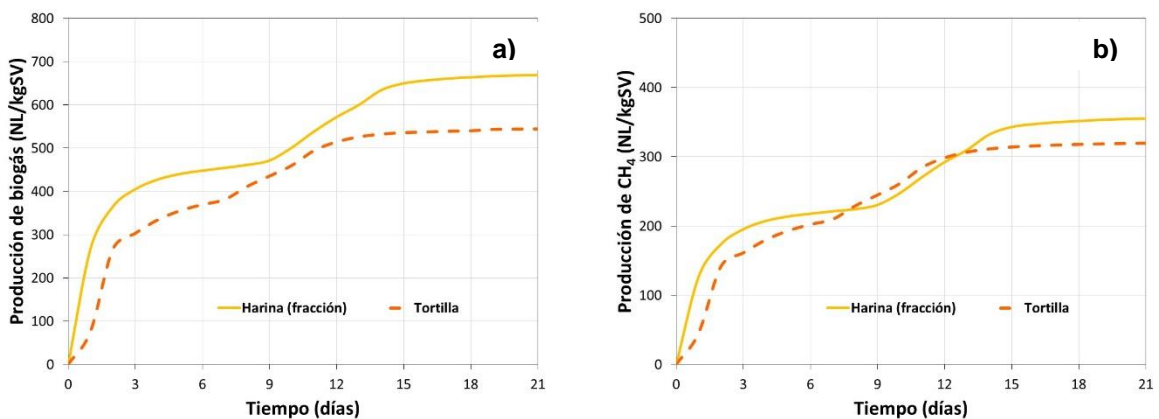
La Figura 7.15a presenta la producción de biogás de la fracción de vegetales y zanahoria. Al día 3 ambas curvas alcanzaron más del 65% del biogás generado en los 21 días. El comportamiento de las dos curvas es similar, ya que tienen un crecimiento diáuxico. La producción de biogás en la zanahoria aumenta entre el día 6 y 9, mientras que para la fracción de vegetales esto ocurre días después, del día 8 al 12, alcanzando un rendimiento de biogás de 506 NL/kg<sub>SV</sub> y el rendimiento de la zanahoria fue mayor con 579 NL/kg<sub>SV</sub>.

Los sustratos de vegetales (Figura 7.15b) muestran un comportamiento similar desde el inicio y ambos alcanzan, al día 3, una producción que corresponde al 60% del metano generado en 21 días. Sin embargo, la zanahoria genera más metano desde el inicio hasta el día 21 alcanzando un rendimiento de metano de un 20% mayor (340 NL/kg<sub>SV</sub>) con respecto a la fracción de vegetales.



**Figura 7.15.** Producción: a) biogás y b) metano de fracción de vegetales y sustrato de referencia.

La Figura 7.16a muestra la producción de biogás de la fracción de harinas y el sustrato tortilla, ambos sustratos son tortillas, sin embargo, el primero se encontraba en la mezcla de la FORSU y el segundo es un sustrato limpio. En la gráfica se puede ver que la fracción de harinas tiene una mayor producción de biogás desde el día 1, la hidrólisis se lleva a cabo de forma más rápida en comparación con el sustrato de tortilla, posiblemente influenciada por los restos impregnados de las demás fracciones. Los dos sustratos para el día 5 ya habían alcanzado el 65% del biogás generado en 21 días. Las tortillas al igual que las harinas tienen un comportamiento diáuxico con una segunda fase de crecimiento que ocurre entre los días 8 y 12. Sin embargo, las tortillas logran una producción menor en comparación con la fracción de harinas, 544 NL/kg<sub>SV</sub> y 669 NL/kg<sub>SV</sub>, respectivamente.



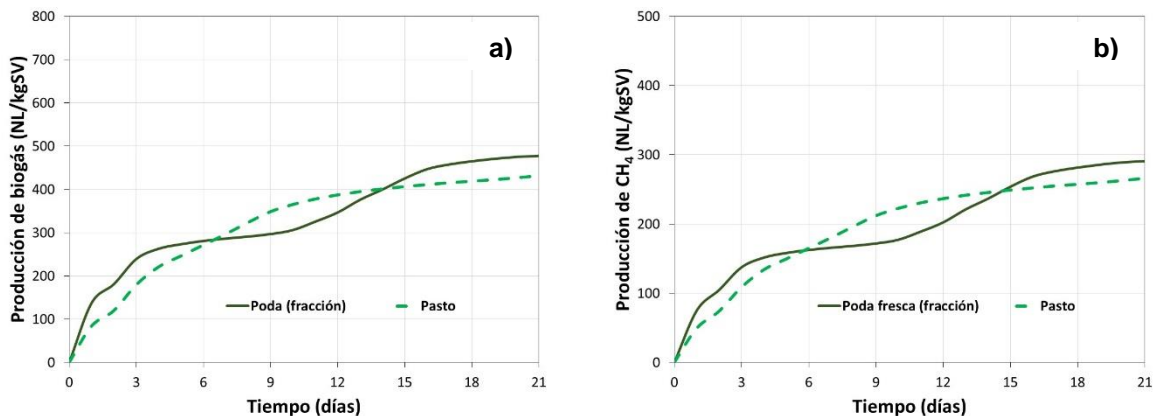
**Figura 7.16.** Producción: a) biogás y b) metano de fracción de harinas y sustrato de referencia.



En la Figura 7.16b se puede observar la producción de metano de la fracción de harinas y tortillas. Nuevamente se observa que la etapa de hidrólisis es mayor en fracción de harinas, favorecida por los restos impregnados. Sin embargo, al día 5 ambas generan el 60 % del metano producido en 21 días. La fase estacionaria que se observa en la fracción de harinas es más larga y marcada que la del sustrato de referencia. Este último alcanza un rendimiento 10% menor (320 NL/ kg<sub>SV</sub>) con respecto La fracción de harinas (355 NL/kg<sub>SV</sub>).

La poda fresca y el pasto (Figura 7.17a) alcanzan al día 6 una producción biogás mayor al 55%. Sin embargo, las curvas tienen comportamientos diferentes. En la fracción de poda fresca la etapa de hidrólisis ocurre más rápido, a partir del día 9 y hasta el día 15 tiene una segunda etapa de crecimiento en la producción de biogás, posteriormente su producción es casi despreciable. Por el contrario, el pasto presenta una sola etapa de crecimiento con un aumento en la producción hasta el día 9 y posteriormente el biogás generado es mínimo, alcanzando un rendimiento de 431 NL/kg<sub>SV</sub>.

La Figura 7.17b muestra que al día 6 ambos sustratos presentan una generación de metano mayor al 55% del obtenido en 21 días. Se puede ver al igual que en la gráfica anterior, que durante la hidrólisis de la fracción de poda la producción es ligeramente mayor. Sin embargo, después presenta una fase estacionaria amplia y hasta el día 9 la producción de metano vuelve aumentar, mientras que el pasto continúa incrementando la generación de metano y partir del día 10 comienza a estabilizarse. La poda se estabiliza a partir del día 15 y alcanza una producción de metano 10 % mayor (291 NL/kg<sub>SV</sub>) que la alcanzado por el pasto.



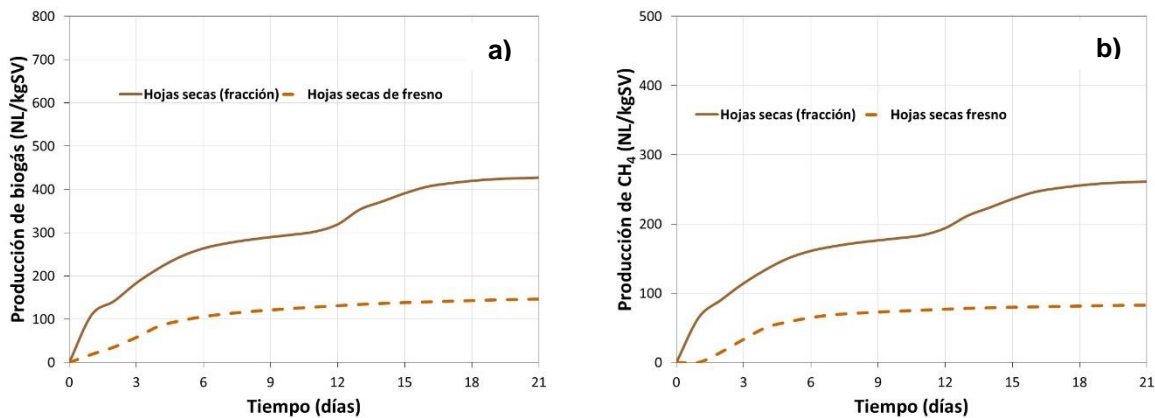
**Figura 7.17.** Producción: a) biogás y b) metano de fracción de poda fresca y sustrato de referencia.

La producción de biogás de los sustratos de hojas secas se muestra en la Figura 7.18a. Al día 6 ambas curvas alcanzan una producción superior al 60% del biogás generado en 21 días; sin embargo, tienen comportamientos diferentes. La producción de biogás en hojas secas de fresno aumenta hasta el día 5 y posteriormente el aumento es mínimo. En contraste, la fracción de hojas secas tiene un comportamiento diáuxico, con dos fases estacionarias. La tercera etapa de crecimiento se da aproximadamente después del día 11 hasta el día 15, donde ya se estabiliza y consigue una producción de 427 NL/kg<sub>SV</sub>. Este fenómeno se debe a un proceso de adaptación enzimático, en el cual los microorganismos disponen enzimas para degradar compuesto A y solo cuando hayan consumido este comenzarán a producir enzimas para degradar el compuesto B (Cohen, 2011).

La producción de metano de hojas secas se muestra en la Figura 7.18b y es posible ver que hay una diferencia importante entre ambos sustratos. El día 4 las hojas secas de fresno

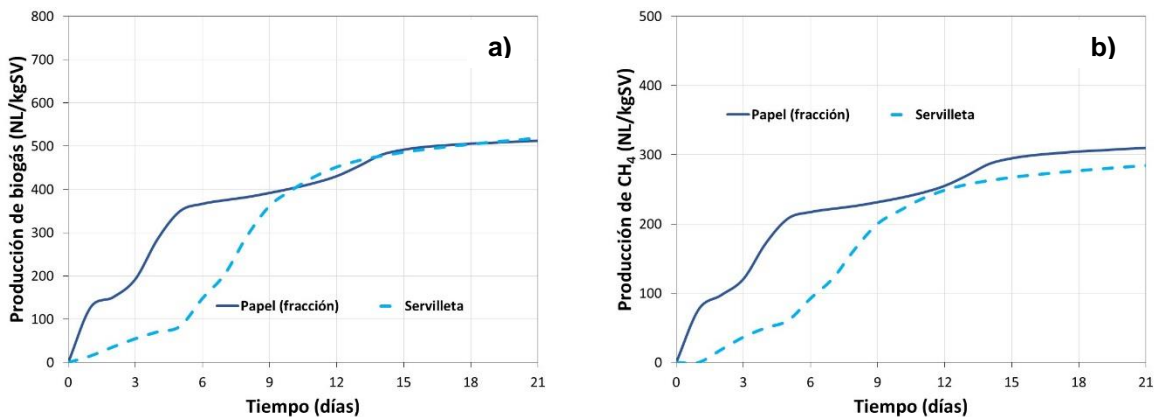


alcanzan el 60% de la producción de metano generado en 21 días, mientras que la fracción de hojas secas lo alcanza el día 6. Las hojas secas de fresno el primer día no presentaron producción de metano y fue hasta el segundo día cuando se registró producción de metano y se puede ver que siguió un comportamiento de una sola etapa de crecimiento. La fracción de hojas secas presenta un comportamiento con dos etapas de crecimiento, siendo el día 10 cuando se registra un aumento en la producción de metano y posteriormente se estabiliza, consiguiendo un rendimiento de metano aproximadamente 3 veces mayor en comparación con las hojas secas de fresno (83 NL/kg<sub>SV</sub>).



**Figura 7.18.** Producción de a) biogás y b) metano de fracción de hojas secas y sustrato de referencia.

En el caso del papel (Figura 7.19a), se puede observar que ambos sustratos consiguen prácticamente la misma producción de biogás. Papel y servilletas presentan un comportamiento diáxico. Sin embargo, en la fracción papel la etapa de hidrólisis es más rápida en comparación con las servilletas, lo que indica que los lixiviados y restos impregnados aceleraron la producción de biogás durante estos días.



**Figura 7.19.** Producción: a) biogás y b) metano de fracción de papel y sustrato de referencia.

Por último, en los sustratos de papel (Figura 7.19b) se puede ver que hay diferencias en el comportamiento de las curvas, sobre todo en la etapa de hidrólisis, donde la fracción de papel presenta una importante producción de metano desde los primeros días. En el caso de las servilletas se presenta la misma situación que las hojas secas de fresno, ya que el primer día no hubo generación de metano por parte del sustrato comenzando el día dos. La fracción de



papel al cuarto día produce más del 60% del metano generado en 21 días y presenta un comportamiento diáuxico en 3 secciones, mientras que la servilleta limpia se tarda cuatro días más en generar la misma proporción con 2 secciones. A partir del día 10 la producción de metano es similar en ambas curvas; sin embargo, la fracción de papel consigue un rendimiento 11% mayor (310 NL/kg<sub>sv</sub>).

La Tabla 7.14 muestra los rendimientos de biogás, el porcentaje de metano en el biogás generado por sustrato, el potencial de metano obtenido durante las pruebas de laboratorio, así como el potencial de metano teórico (TPBM) y el porcentaje de degradabilidad estimado con ayuda del TPBM.

La producción de biogás y metano más baja la tienen las hojas secas de fresno con 147 y 83 NL/kg<sub>sv</sub>, respectivamente. Tienen un porcentaje de metano en el biogás de 55% y una degradabilidad calculada del 18%. Como valor intermedio de producción de metano se tiene a las servilletas, las cuales obtienen una producción de biogás de 519 NL/kg<sub>sv</sub>, un porcentaje de metano en biogás de 55% y una degradabilidad del 60%.

La mayor producción de biogás la obtiene la cáscara de naranja con 581 NL/kg<sub>sv</sub>. El 57% del biogás correspondió a metano, por lo que su producción de metano fue de 332 NL/kg<sub>sv</sub> y, de acuerdo con lo calculado, alcanza una degradabilidad del 92%. La producción de biogás de la zanahoria fue de 579 NL/kg<sub>sv</sub> con una composición de metano en el biogás del 59% correspondiendo a 340 NL/kg<sub>sv</sub> de metano y, de acuerdo con lo calculado, alcanza una degradabilidad del 68%.

**Tabla 7.14.** Producción de biogás y metano durante la prueba de PBM.

| Sustrato              | Biogás NL/kg <sub>sv</sub> | CH <sub>4</sub> en biogás % | PBM NLCH <sub>4</sub> /kg <sub>sv</sub> | TPBM NLCH <sub>4</sub> /kg <sub>sv</sub> | Degradabilidad anaerobia (%) |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|------------------------------|
| Cáscara de naranja    | 581                        | 57                          | 332                                     | 359                                      | 92                           |
| Cáscara de plátano    | 382                        | 64                          | 246                                     | 463                                      | 53                           |
| Uvas verdes           | 562                        | 58                          | 326                                     | 577                                      | 56                           |
| Zanahoria             | 579                        | 59                          | 340                                     | 500                                      | 68                           |
| Tortillas             | 544                        | 59                          | 320                                     | 332                                      | 96                           |
| Pasto fresco          | 431                        | 62                          | 266                                     | 376                                      | 71                           |
| Hojas secas de fresno | 147                        | 56                          | 83                                      | 458                                      | 18                           |
| Servilletas de papel  | 519                        | 55                          | 285                                     | 475                                      | 60                           |

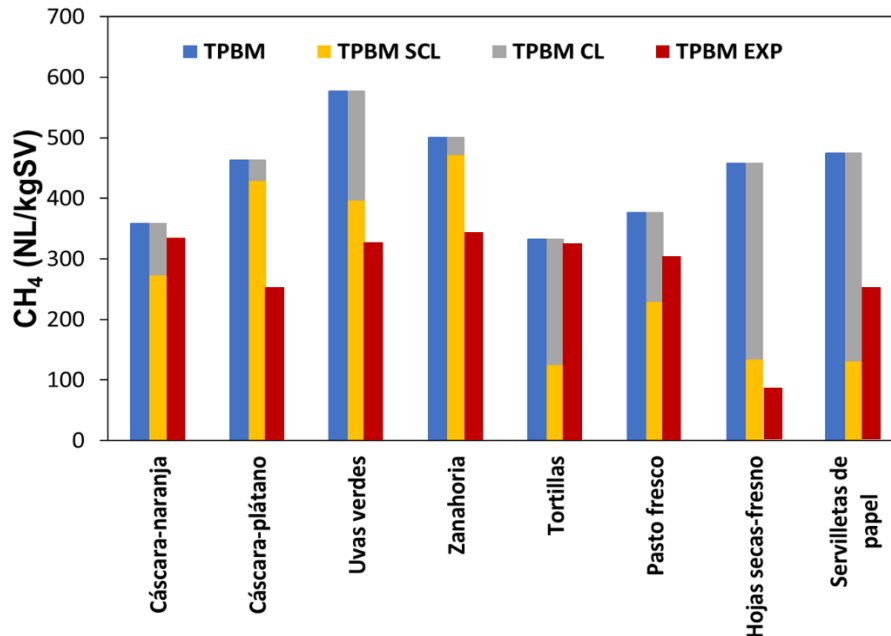
Los sustratos de referencia se pudieron subdividir en grupos con biodegradabilidad anaerobia alta y baja. Zanahoria (68%), pasto (71%), cáscara de naranja (92%) y tortilla (96%) tienen una biodegradabilidad anaerobia alta, mientras que hojas secas de fresno (18%), cáscara de plátano (53%), uvas (56%) y servilletas (60%) tienen una biodegradabilidad baja.

Se realizó el mismo procedimiento que se menciona en el capítulo 7.3.1 para evaluar la influencia de los compuestos lignocelulósicos sobre la biodegradabilidad de los sustratos de referencia. En los resultados que se muestran en la Figura 7.20, se observa que ocurre lo mismo que en las fracciones ya que el potencial bioquímico de metano teórico (TPBM) es mayor al valor obtenido experimentalmente en todos los sustratos.



El potencial bioquímico de metano sin considerar compuestos lignocelulósicos (TPBM<sub>SCL</sub>) de cáscara de naranja, tortillas, pasto y servilletas es inferior al PBM, mientras que es mayor en el caso de cáscara de plátano, uvas, zanahoria y hojas secas.

Por lo tanto, en la conversión a metano de componentes orgánicos como cáscara de naranja, tortillas, pasto y servilletas se asume que una parte de los compuestos lignocelulósicos se degradaron debido a que el PBM experimental es mayor que el calculado a partir de proteínas, lípidos y carbohidratos degradables (TPBM<sub>SCL</sub>) y consigue cubrir parte del TPBM<sub>CL</sub>. Lo anterior puede indicar nuevamente que esta parte que se cubrió de los compuestos lignocelulósicos logró transformarse a metano debido a un menor grado de lignificación y cristalinidad de la celulosa.



**Figura 7.20.** Potencial bioquímico de metano teórico (TPBM), potencial bioquímico de metano sin compuestos lignocelulósicos (TPBM<sub>SCL</sub>), potencial bioquímico de metano de compuestos lignocelulósicos (TPBM<sub>CL</sub>) y potencial bioquímico de metano experimental (PBM<sub>EXP</sub>) de sustratos de referencia.

En el caso de las servilletas al ser un material vegetal que pasó por un tratamiento industrial para su elaboración, la mayor parte de la celulosa no se encuentra ligada a la lignina y por lo tanto es degradable y esto se comprueba con lo mostrado en la Figura 7.20.

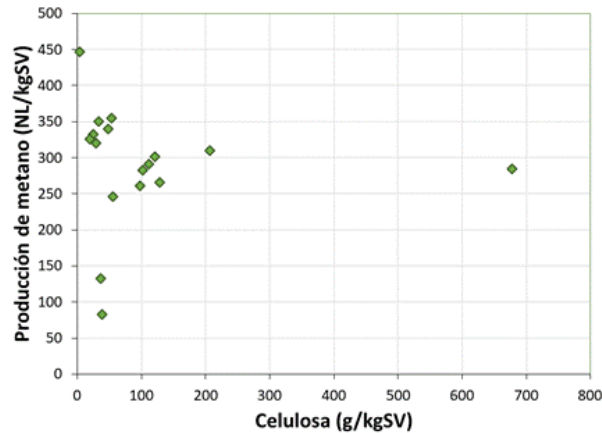
#### 7.4.5. Comportamiento de la producción de metano con respecto al contenido de compuestos lignocelulósicos

Las Figuras 7.21 a 7.23 muestran el comportamiento de la producción de metano en todos los sustratos (fracciones y sustratos de referencia), con respecto al contenido de compuestos lignocelulósicos.

En cuanto a la Figura 7.21, es posible ver que evidentemente existen algunos valores atípicos, el caso más relevante es el de una observación de celulosa de 678 g/kg<sub>SV</sub> (servilletas de papel), este caso es de interés, ya que se podría analizar y proponer excluirlo del trabajo debido a que su gran magnitud y diferencia con los demás puede influir cuando se hallen modelos predictivos como una regresión. Con dos excepciones, ramas, y hojas secas, se

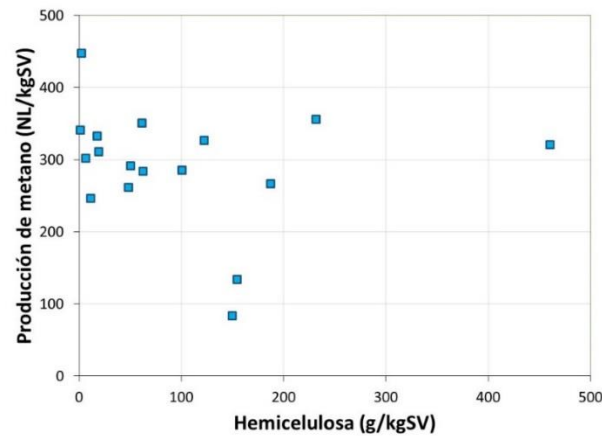


observa que la producción de metano aumenta de manera inversa con el contenido de celulosa cuando las concentraciones de celulosa son relativamente bajas (hasta 207 g/kg<sub>SV</sub>).

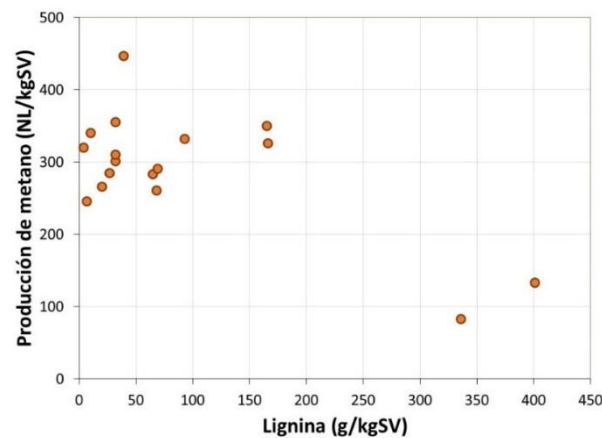


**Figura 7.21.** Producción de metano con respecto al contenido de celulosa

En las Figuras 7.22 y 7.23 los puntos no reflejan alguna clara tendencia, por lo que no presentan una relación observable de producción de metano con respecto al contenido de hemicelulosa y lignina, respectivamente.



**Figura 7.22.** Producción de metano con respecto al contenido de hemicelulosa



**Figura 7.23.** Producción de metano con respecto al contenido de lignina





## 7.5. Análisis estadístico

### 7.5.1. Análisis estadístico de fracciones

El análisis estadístico tiene como objetivo estudiar cada una de las variables para comprobar si existe una influencia de los compuestos lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) sobre el potencial bioquímico de metano (PBM) y posteriormente explicarlo mediante un modelo de regresión múltiple.

#### 7.5.1.1 Análisis descriptivo

Primero se realizó un análisis descriptivo para determinar el comportamiento de la variable dependiente PBM y las variables independientes: carbohidratos degradables, proteínas, grasas, celulosa, hemicelulosa y lignina. La tabla 7.15 muestra los parámetros estadísticos más importantes.

**Tabla 7.15.** Estadística descriptiva

| Estadístico         | CD        | P       | G       | C      | H       | L       | PBM      |
|---------------------|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|
| Media               | 294.444   | 129.667 | 165.333 | 85     | 71.333  | 100.333 | 303.444  |
| Mediana             | 259       | 121     | 151     | 98     | 51      | 65      | 301      |
| Desviación estándar | 195.757   | 96.339  | 95.017  | 61.241 | 75.271  | 120.223 | 84.342   |
| Varianza            | 38320.778 | 9281.25 | 9028.25 | 3750.5 | 5665.75 | 14453.5 | 7113.528 |
| Curtosis            | 3.527     | 6.577   | 4.591   | 0.779  | 1.784   | 6.036   | 2.225    |
| Asimetría           | 1.549     | 2.400   | 1.970   | 0.745  | 1.504   | 2.419   | -0.493   |
| Mínimo              | 63        | 44      | 81      | 4      | 3       | 32      | 133      |
| Máximo              | 743       | 373     | 393     | 207    | 232     | 401     | 447      |

CD: carbohidratos degradables, P: proteínas, G: grasas y aceites, C: celulosa, H: hemicelulosa y L: lignina

En cuanto al PBM, la tabla muestra que el valor mínimo es 133 que corresponde a ramas, mientras que el máximo es 447 que corresponde a residuos de origen animal, por lo tanto, el rango es de 314 indicando una gran variabilidad entre el máximo valor registrado y el mínimo. Así mismo la media es 303.444 con una desviación estándar de 84.342. La media y mediana son parecidas por lo que el coeficiente de asimetría está por debajo de 1, es decir la distribución es simétrica.

Al observar las variables que son de interés en este trabajo, celulosa, hemicelulosa y lignina, se puede decir que: celulosa tiene un valor mínimo de 4 (origen animal) y máximo de 207 (papel), con una media de 85 y desviación estándar de 61.241, aunque la media y la mediana no son iguales el coeficiente de asimetría es bajo, por lo tanto, su distribución es simétrica.

Hemicelulosa tiene un valor mínimo de 3 (origen animal) y un máximo de 232 (harinas), con una media de 71.333 y desviación estándar de 75.271, como la media y la mediana difieren el coeficiente de simetría es mayor a 1, es decir, la distribución es asimétrica.



Lignina tiene un valor mínimo de 32 (frutas) y un máximo de 401 (ramas) con una media de 100.333 y desviación estándar de 120.223, la distribución es asimétrica debido a que coeficiente de asimetría es mayor a 1.

En cuanto a las demás variables, carbohidratos, proteínas y grasas, se comportan de la siguiente manera: En carbohidratos, el valor mínimo corresponde a residuos de origen animal mientras que el máximo lo tiene el papel, la media y mediana no son iguales por lo tanto el coeficiente de asimetría es mayor a 1, además se observa una curtosis elevada.

En proteínas, el valor mínimo corresponde a ramas mientras que el valor máximo lo tienen los residuos de origen animal, la media y mediana no son iguales por lo que los coeficientes de asimetría y curtosis son elevados. En grasas, el valor mínimo lo tienen las frutas, mientras que el valor máximo corresponde a origen animal, la media y mediana no son iguales por lo que los coeficientes de asimetría y curtosis son elevados.

### 7.5.1.2. Correlación

Para determinar la relación que existe entre las variables, se calculó el coeficiente de correlación con el fin de saber cuáles variables están relacionadas con el PBM y a su vez dichas variables deben ser independientes. La correlación también es conocida por cuantificar el grado de asociación entre dos variables, dicha asociación puede tomar valores entre -1 y 1.

En la Tabla 7.16 se puede observar que el PBM, variable dependiente, está directamente relacionado con las variables proteínas y grasas ya que el coeficiente de correlación es 0.781 y 0.698, respectivamente. Ambas relaciones son positivas esto quiere decir que a medida que aumenta el PBM también aumentan las variables proteínas y grasas. Mientras que inversamente relacionado con la lignina, su coeficiente de correlación es -0.719. Al tener una alta correlación negativa, se puede interpretar que mientras el PBM aumenta, la lignina disminuye y viceversa.

Tabla 7.16. Matriz de correlación

|               | CD     | P            | G            | C      | H      | L             | PBM |
|---------------|--------|--------------|--------------|--------|--------|---------------|-----|
| Carbohidratos | 1      |              |              |        |        |               |     |
| Proteínas     | -0.555 | 1            |              |        |        |               |     |
| Grasas        | -0.236 | 0.856        | 1            |        |        |               |     |
| Celulosa      | 0.932  | -0.542       | -0.310       | 1      |        |               |     |
| Hemicelulosa  | -0.360 | -0.312       | -0.423       | -0.346 | 1      |               |     |
| Lignina       | -0.144 | -0.339       | -0.268       | -0.400 | 0.377  | 1             |     |
| PBM           | -0.276 | <b>0.781</b> | <b>0.698</b> | -0.190 | -0.296 | <b>-0.719</b> | 1   |

CD: carbohidratos degradables, P: proteínas, G: grasas y aceites, C: celulosa, H: hemicelulosa y L: lignina

Así mismo, se muestra que la variable lignina tiene coeficientes de correlación bajos, es decir, no tiene relación con carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa. En cuanto a hemicelulosa, los coeficientes de correlación también son bajos, por lo que no existe correlación con carbohidratos, proteínas, grasas y celulosa. La celulosa tiene una alta relación positiva con los carbohidratos, mientras que no tiene relación con proteínas y grasas y a su vez grasas no tiene relación con carbohidratos, pero si tiene una alta relación con las proteínas.



### 7.5.1.3. Modelos

Se realizó en una primera etapa un modelo con las variables de regresión lineal múltiple, ajustado con el modelo de mínimos cuadrados con las variables que en valores absolutos tienen mayor correlación con el PBM: proteínas, grasas y lignina (Tabla 7.17).

**Tabla 7.17.** Regresión lineal de proteínas, grasas y lignina

| Ecuación  | p-value (F) | ET     | R <sup>2</sup> |
|---|-------------|--------|----------------|
| <b>PBM = 263.487 + 0.415 Proteínas + 0.136 Grasas – 0.363 Lignina</b> | 0.017       | 41.316 | 0.760          |

|                     | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>t value</i> | <i>Pr(&gt;) t </i> |
|---------------------|----------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| <b>Intercepción</b> | 263.487              | 34.993              | 7.530          | 0.0006             |
| <b>Proteínas</b>    | 0.415                | 0.300               | 1.382          | 0.225              |
| <b>Grasas</b>       | 0.136                | 0.297               | 0.458          | 0.666              |
| <b>Lignina</b>      | -0.363               | 0.129               | -2.807         | 0.038              |

En la Tabla 7.17 es posible observar que no todas las variables son significativas debido a que su p-value es mayor de 0.05, como proteínas y grasas. Por lo que a pesar de que en el análisis de correlación las grasas y proteínas están altamente relacionadas con el PBM, estas no son determinantes en el modelo. Para este modelo lo mejor sería excluir a las proteínas y grasas, solamente retener la lignina junto con el intercepto, el R<sup>2</sup> disminuiría su magnitud, pero tendría variables significativas.

Por lo anterior, posteriormente se realizó un modelo general con todas las variables independientes: carbohidratos degradables, proteínas, grasas, celulosa, hemicelulosa y lignina. En la Tabla 7.18 se puede observar que las variables lignina, celulosa y carbohidratos degradables son significativos debido a que su p-value es menor a 0.05, el resto de las variables no son significativas para el modelo.

**Tabla 7.18.** Regresión lineal con todas las variables independientes

| Ecuación  | p-value (F) | ET     | R <sup>2</sup> |
|---|-------------|--------|----------------|
| <b>PBM = 484.188 + 0.765 CD* – 0.186 Proteínas + 0.109 Grasas – 3.473 Celulosa + 0.034 Hemicelulosa – 1.069 Lignina</b> | 0.015       | 12.011 | 0.980          |

CD: carbohidratos degradables, ET: error típico

|                                  | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>t value</i> | <i>Pr(&gt;) t </i> |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| <b>Intercepción</b>              | 484.188              | 42.242              | 11.462         | 0.008              |
| <b>Carbohidratos degradables</b> | 0.765                | 0.119               | <b>6.422</b>   | <b>0.023</b>       |
| <b>Proteínas</b>                 | -0.186               | 0.170               | -1.097         | 0.387              |
| <b>Grasas</b>                    | 0.109                | 0.114               | 0.957          | 0.440              |
| <b>Celulosa</b>                  | -3.473               | 0.490               | <b>-7.082</b>  | <b>0.019</b>       |
| <b>Hemicelulosa</b>              | 0.035                | 0.083               | 0.420          | 0.715              |
| <b>Lignina</b>                   | -1.069               | 0.104               | <b>-10.292</b> | <b>0.009</b>       |



### Backward

Para definir cuales variables son determinantes en el modelo se realizó el método paso a paso (stepwise), usando la estrategia de backward. Aranaz (2002) define el método paso a paso como la aplicación de criterios de bondad de ajuste para decidir que predictores contribuyen significativamente al modelo. La estrategia backward consiste en iniciar el modelo con todas las variables disponibles, posteriormente se prueba eliminar una a una cada variable en presencia de otras.

En este orden de ideas, luego de realizar todas las combinaciones, los únicos modelos con un p-value significativo son los que se muestran en la Tabla 7.19.

**Tabla 7.19.** Datos de regresión lineal y t value

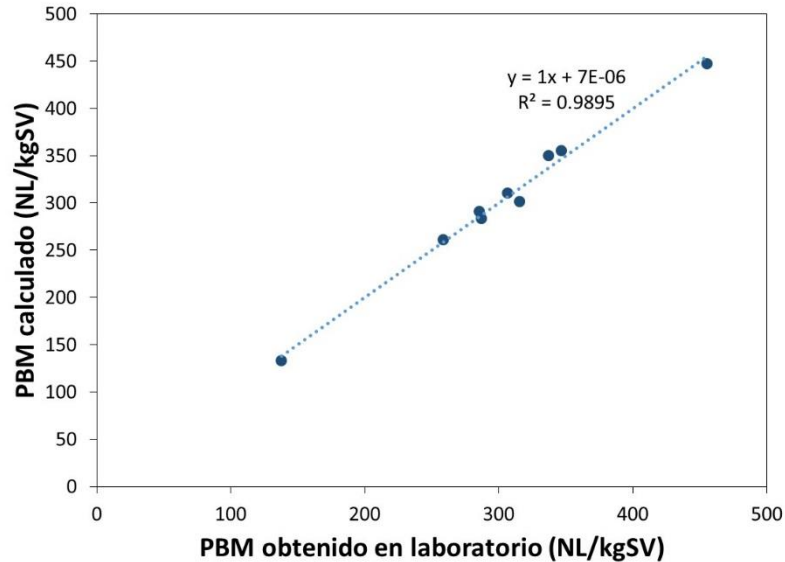
| Modelo  | F       | p-value (F) | ET     | R <sup>2</sup> |
|---|---------|-------------|--------|----------------|
| i) PBM= 460.836 - 0.989lignina - 3.222celulosa + 0.733carbohidratos degradables | 156.373 | 0.00002     | 10.955 | 0.983          |
| ii) PBM = 436.763 - 0.665lignina - 0.784celulosa                                | 11.271  | 0.009       | 44.653 | 0.789          |
| iii) PBM = 354.085 - 0.505lignina   | 7.511   | 0.029       | 62.623 | 0.518          |

| Variable                  | P-value de la t de student |          |          |
|---------------------------|----------------------------|----------|----------|
|                           | i                          | ii       | iii      |
| Intercepción              | 0.00000005                 | 0.000001 | 0.000004 |
| Lignina                   | 0.000005                   | 0.003    | 0.029    |
| Celulosa                  | 0.00006                    | 0.032    | -        |
| Carbohidratos degradables | 0.0002                     | -        | -        |

La Tabla 7.19 indica que en el modelo ii, el R<sup>2</sup> aumentó a 0.789 al agregar la variable celulosa también aumentó el estadístico F por lo que el p-value es significativo y se puede decir que el modelo ha mejorado. Al observar los p-value de la t student de cada variable en el modelo, indica que la variable lignina es significativa y la celulosa también es significativa al 95% de confianza.

El modelo i, muestra que el R<sup>2</sup> aumentó a 0.98 al agregar la variable carbohidratos degradables y el estadístico F es el más alto (156.373) de los modelos probados, por lo cual el modelo es significativo y se comprueba con el p-value que es 0.00002. Así mismo, al observar los valores p de la t student nos indica que las variables lignina, celulosa y carbohidratos son significativas.

En la Figura 7.24 se puede observar que la línea de tendencia obtenida a partir del modelo "i" y el PBM de laboratorio, está muy cerca del mejor ajuste cuando "y" tiene un error típico de 10.955.



**Figura 7.24.** PBM obtenido en laboratorio vs PBM calculado en fracciones usando el modelo i

#### 7.5.1.4. Prueba de hipótesis

Se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existe diferencia entre las medias de **PBM** y **lignina**, para esto se realizaron los 5 pasos definidos en el libro de Lind *et al.* (2005).

#### 1) Se establecen las hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2,$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

#### 2) Se elige el nivel de significancia

El nivel de significancia es del 5%, es decir  $\alpha = 0.05$

#### 3) Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

Donde  $s^2$  es el estimador de la varianza común definido como:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Primero se calculó la media y varianza del PBM y lignina

Para el PBM la media es 303.44 y la varianza 7113.52.

Para lignina la media es 100.33 y la varianza 14453.5

Se sustituyeron valores en la ecuación

$$s^2 = \frac{(9 - 1) * 7113.52 + (9 - 1) * 14453.5}{9 + 9 - 2}$$

$$s^2 = 10783.51$$



Ahora se sustituye en t

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} = \frac{303.44 - 100.33}{\sqrt{\frac{10783.51}{9} + \frac{10783.51}{9}}}$$
$$t = \frac{203.11}{48.95} = 4.14$$

#### 4) Región de rechazo

El t tabulado es igual a  $t_{1-\alpha/2, (9+9-2)} = t_{0.975, 16} = 2.128$ . Si la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula. También se muestra en la Figura 7.25 de la región de rechazo, donde si el estadístico calculado se encuentra en la zona roja, se rechaza la hipótesis nula.

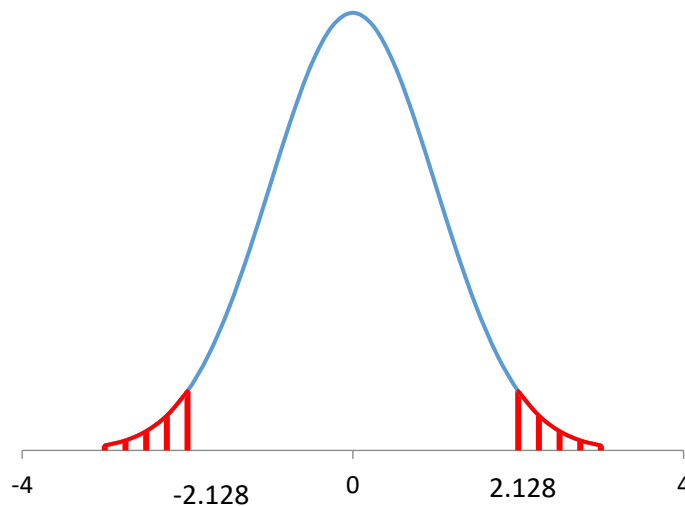


Figura 7.25. Región de rechazo.

#### 5) Decisión

Como la t calculada es mayor a la t tabulada, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, existe relación entre las variables PBM y lignina. Concluyendo que promedios del PBM y lignina difieren.

Se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existe diferencia entre los promedios de **PBM y celulosa**

##### 1) Se establecen las hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_3,$$
$$H_1: \mu_1 \neq \mu_3$$

##### 2) Se elige el nivel de significancia

El nivel de significancia es del 5%, es decir  $\alpha = 0.05$



### 3) Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

Donde  $s^2$  es el estimador de la varianza común definido como:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Primero se calculó la media y varianza del PBM y celulosa

Para el PBM la media es 303.44 y la varianza 7113.52.

Para celulosa la media es 85 y la varianza 3750.56

Se sustituyeron valores en la ecuación

$$s^2 = \frac{(9 - 1) * 7113.52 + (9 - 1) * 3750.56}{9 + 9 - 2}$$

$$s^2 = 5432.04$$

Ahora se sustituye en t

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} = \frac{303.44 - 85}{\sqrt{\frac{5432.44}{9} + \frac{5432.44}{9}}}$$

$$t = \frac{218.44}{34.74} = 6.28$$

### 4) región de rechazo

El t tabulado es igual a  $t_{1-\alpha/2, (9+9-2)} = t_{0.975, 16} = 2.128$ . Si la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula, de la misma forma que se mostró en la Figura 7.25.

### 5) Decisión

Como la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, existe relación entre la variable PBM y la celulosa. Las medias de ambas son diferentes. Finalmente se comprueba también mediante una prueba de hipótesis que existe relación entre el PBM y compuestos lignocelulósicos (celulosa y lignina).

En el Anexo D es posible ver el análisis estadístico realizado para los sustratos de referencia como complemento de la información presentada en este trabajo.



## 8. CONCLUSIONES

- A partir de la FORSU de la Ciudad de México se lograron identificar 10 fracciones. De las cuales: *ramas*, *hojas secas*, *poda fresca*, *sin clasificar*, *papel* y *vegetales* son las que muestran un mayor contenido de compuestos lignocelulósicos y representan el 56% de la FORSU.
- De las 9 fracciones analizadas, la fracción de *ramas* tiene el mayor contenido de compuestos lignocelulósicos con 592 g/kg<sub>SV</sub> y el menor lo tienen los residuos de *origen animal* con 46 g/kg<sub>SV</sub>. Sin embargo, la mayor aportación de compuestos lignocelulósicos la dan las *frutas* con 27% y la menor la proporcionan los residuos de *origen animal* y el *papel* con 2%.
- Con excepción de *ramas*, la producción de metano se llevó a cabo en dos etapas, la segunda iniciando a partir del día 6 de incubación y notando que, durante la primera etapa se produce aproximadamente el 60% del metano total.
- La mayor producción de metano la consiguieron los residuos de *origen animal* con 499 NL/kg<sub>SV</sub> y el menor contenido de compuestos lignocelulósicos. Mientras que la menor producción de metano la tienen las *ramas* con 133 NL/kg<sub>SV</sub> y un contenido de material lignocelulósico casi 13 veces mayor.
- El mayor aporte de metano lo tiene la fracción de *frutas* generando 108 NL/kg<sub>SV</sub> del total generado por la FORSU con una biodegradabilidad calculada del 85% y el menor aporte lo da la fracción de *ramas* con solo 5 NL/kg<sub>SV</sub> con una biodegradabilidad del 22%.
- Debido a la producción de metano alcanzada por las diferentes fracciones y el comportamiento de las curvas durante los 21 de digestión, se logra concluir que las fracciones ricas en fibra como: *vegetales*, *sin clasificar* y *papel* podrían ser suficientemente degradables en digestión anaerobia y por lo tanto permitidas dentro de la FORSU.
- Con dos excepciones, *ramas* y *hojas secas*, la producción de metano aumenta de manera inversa con el contenido de celulosa en fracciones y sustratos.
- Las *servilletas* limpias presentan un mayor contenido de celulosa (678 g/kg<sub>SV</sub>) que la fracción *papel* (207 g/kg<sub>SV</sub>) la cual se encontraba, previamente a la digestión anaerobia,





empapada de lixiviados. Mientras que las *tortillas* al igual que el *pasto* y las *servilletas*, presentan un mayor contenido de hemicelulosa (461, 188 y 101 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente) que las fracciones: *harinas*, *poda fresca* y *papel* (232, 51 y 20 g/kg<sub>SV</sub>, respectivamente).

- En las muestras donde el sustrato de referencia fue representativo de la fracción se puede ver en las curvas de producción de metano que las fracciones se vieron favorecidas en la etapa de hidrólisis con respecto a su sustrato de referencia. Debido a que los lixiviados que se generan de los residuos durante su manejo y los restos impregnados de otras fracciones contribuyeron en la producción de metano durante esta etapa. Siendo más notorio este comportamiento en la fracción de *papel* por la elevada capacidad de absorción que tiene el sustrato.
- En las muestras donde el sustrato de referencia fue representativo de la fracción se puede ver que el rendimiento de metano que consiguen a los 21 días de digestión, tanto fracciones como sustratos de referencia son similares, con una diferencia de un 10 a 15%.
- En las fracciones: *frutas*, *vegetales*, *harinas* y *residuos sin clasificar*, y sustratos: *cáscara de naranja*, *tortillas*, *pasto* y *servilletas* se asume que una parte de los compuestos lignocelulósicos se degradaron debido a que el PBM obtenido de las pruebas de laboratorio es mayor al calculado; lo que podría indicar que en las fracciones de *frutas*, *vegetales*, *harinas* y *residuos sin clasificar* más compuestos lignocelulósicos se transformaron a metano debido a un grado menor de lignificación y probablemente también a una menor cristalinidad de la celulosa.
- Al ser menor el PBM obtenido en laboratorio que el TPMB<sub>SCL</sub> se consigue concluir que en las fracciones de residuos de vegetación (*hojas secas* y *ramas*) no se degradaron compuestos lignocelulósicos y hubo una incompleta degradación de carbohidratos degradables, proteínas y lípidos.
- En las fracciones identificadas en la FORSU de la Ciudad de México se observó que el mejor modelo se tiene de la influencia de compuestos lignocelulósicos en específico de la matriz celulosa-lignina y carbohidratos degradables, ya que son variables estadísticamente significativas que contribuyen (positiva o negativamente) sobre el rendimiento de metano de la FORSU. Cumpliendo con un nivel de confianza del 95% y  $R^2 = 0.983$ .
- El análisis estadístico muestra que la caracterización bromatológica completa (carbohidratos degradables, proteínas, grasas, celulosa, hemicelulosa y lignina) presenta una influencia en el rendimiento del metano alcanzado a los 21, sin importar si el sustrato se encuentra limpio o mezclado en la FORSU. Con esto se confirma lo presentado en las gráficas donde se comparan fracciones con sustratos, ya que ambas alcanzan un rendimiento de metano similar sin importar su estado inicial.
- Por pruebas de hipótesis se corrobora que existe una relación negativa de lignina y PBM. Así como, existe una relación negativa de celulosa y PBM en las fracciones de la FORSU, al destacar que las medias son diferentes en dichas variables.



- 
- Para la predicción del potencial bioquímico de metano tanto en fracciones como en sustratos de referencia se requiere tener los valores de los compuestos lignocelulósicos, especialmente lignina, de lo contrario el modelo que considere únicamente grasas, proteínas y carbohidratos, no será estadísticamente significativo.



## REFERENCIAS

- 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, 147-155.
- Alibardi, L., Cossu, R. (2016). Effects of carbohydrate, protein and lipid content of organic waste fraction and fermentation products. *Waste Management*. 47, 69-77.
- Al Seadi, T., Lukehurst, C. (2012). Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser. IEA Bioenergy.
- Alves, M.M., Pereira, M.A., Souza, D.Z., Cavaleiro, A.J., Picavet, M., Smidt, H., Stams, A.J.M. (2009). Waste lipids to energy: how to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). *Microbial Biotechnology*, 2(5), 538-550.
- 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*. 59.5, 927-932.
- AOAC. (2012). *AOAC Official Methods of Analysis*, 19th ed. In: George Latimer, Jr. (Ed.), Association of Official Analytical Chemists, USA.
- APHA. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater 21a ed. American Public Health Association, American Water Works Association y Water Pollution Control Federation. Washington D.C., EEUU.
- Aranaz, M.F. (2002). SPSS para Windows. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Araujo, J., Waldman, W., and De Paoli, M., 2008. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability* 93, 1770-1775.
- Buffiere, P., Loisel, 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).
- Buenrostro-Delgado, O., Hernández-Paniagua, I.Y., Hernández-Berriel, M. C., Nila-Cuevas, J.A. (2015). Análisis de compuestos lignocelulósicos como opción para evaluar la biodegradabilidad de la fracción orgánica en residuos sólidos confinados en México. *Biológicas*. 17 (2), 1-4.
- Burke, D. A. (2001). *Dairy waste anaerobic digestion handbook*. Option for recovering beneficial products from dairy manure. Environmental Energy Company. Olympia Washington, EEUU. Pp. 16-35.
- Campuzano, R., González-Martínez, S. (2015). Extraction of soluble substances from organic solid municipal waste to increase methane production. *Bioresource technology*. 178, 247-253.



- Campuzano, R., González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*. 54, 3-12.
- Cohen, G.N., 2011. *Microbial Biochemistry*. Segunda edición. Editorial Springer. Paris, Francia. Pp.1-10.
- Cuervo, L., Folch, J. L., Quiroz, R. E. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol, *BioTecnología*, 13(3), 11-25.
- DEFRA, (2013). Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste. Reino Unido: DEFRA.
- DeMartini, J.D., Pattathil, S., Miller, J.S., Li, H., Hahn, M.G., Wyman, C.E. (2013). Investigating plant cell wall components that affect biomass recalcitrance in poplar and switchgrass. *Energy Environ. Sci.* 6, 898–909.
- Deublein, D., Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable Resources: An introduction*. Segunda edición. Wiley-VCH. Weinheim, Alemania.
- Dong, L., Zhenhong, Y., Yongming, S., Xiaoying, K., Yu, Z. (2009). Hydrogen production characteristics of the organic fraction of municipal solid wastes by anaerobic mixed culture fermentation. *Hydrogen Energy*. 34, 812-820.
- Edwiges, T., Frare, L., Mayer, B., Lins, L., Triolo, J.M., Flotats, X., de Mendosa Costa, M.S.S. (2017). Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. *Waste Management*. 71, 618-625.
- Elbeshbishy, E., Nakhla, G., Hafez, H. (2012). Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. *Bioresource Technology*. 110 (2012), 18-25.
- Fernández, J. (2008). Caracterización cinética de la degradación anaerobia termofílica seca de la FORSU. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo. Universidad de Cádiz.
- Flores D.E. (2014). Potencial metanogénico de residuos lignocelulósicos específicos disponibles en las fincas agrícolas costarricenses para cogeneración. Tesis doctoral, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Frigon, J.C., Guiot, S. R. (2010). Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(4).
- González-Miranda, U., Gonzalez-Martinez, U., Campuzano, R. (2016). Methane production from organic solid waste components. Sixth International Symposium on Energy from Biomass and Waste.
- Hartmann, H., Ahring, B. K. (2006) Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. *Water Science and Technology*. 53 (8) 7-22.
- Hendriks, A. T. W. M., Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*. 100(1), 10-18.
- Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J.M. (2015). Biochemical methane potential of livestock and agri-food waste streams in the Castilla y León Region (Spain). *Food Research International*. 73, 226-233.
- Hoorweg, D., Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: a global review of solid waste management. World Bank Urban development series, knowledge papers no. 15. Washington, D.C.
- Hu, F., Rgauskas, A. (2012). Pretreatment and Lignocellulosic Chemistry. *Bioenerg. Res.* 5, 1043–1066
- IDAE, (2007). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Biomasa: Digestores Anaerobios. Energía de la biomasa. *Energías Renovables*. 4-42. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_Digestores\\_Anaerobios\\_A2007\\_0d62926d.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf)
- INEGI, (2013). Información estadística-medio ambiente. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.



- Izumi, K., Okishio, Y., Nagao, N., Niwa, C., Yumamoto, S., Toda, T. (2010). Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 64, 601-608.
- Kambo, H.S., Dutta, A., (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45, 359-378.
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*. 31(8), 1737-1744.
- Khanal, S. K. (2008). Anaerobic biotechnology for bioenergy production. Wiley-Blackwell. Iowa, Estados Unidos. 179.
- Kobayashi, T., Xu, K. Q., Li, Y. Y., Inamori, Y. (2012). Evaluation of hydrogen and methane production from municipal solid wastes with different compositions of fat, protein, cellulosic materials and the other carbohydrates. *International journal of hydrogen energy*. 37(20), 15711-15718.
- Labatut, R., Angenent, L. T., Scott, N. R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*. 102 (3) 2255-2264.
- Laurinovic, L., Jasko, J., Skripsts, E., & Dubrovskis, V. (2013). Biochemical methane potential of biologically and chemically pretreated sawdust and straw. In 12th International Scientific Conference Engineering for Rural Development.
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., González, C., Latriille, E., Roger, J. M., Junqua, G., Steyer, J. P. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*. 45(4), 431-440.
- LGPGIR, (2018). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Última reforma publicada DOF 19-01-2018, México.
- Li, Y., Jin, Y., Borrion, A., Li, H., Li, J. (2017). Effects of organic composition on mesophilic anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*. 244, 213-224.
- Lind, D.A., Marchal, W.G., Wathen, S.A. (2005). Estadística aplicada a los negocios y economía. McGraw-Hill.
- Martínez AT, Ruiz-Duenas FJ, Martínez MJ, Del Río JC, Gutiérrez A (2009) Enzymatic delignification of plant cell wall: from nature to mill. *Curr Opin Biotechnol*. 20(3), 348-357.
- Martínez, A.T., Speranza, M., Ruiz-Dueñas, F.J., Ferreira, P., Camarero, S., Guillén, F. (2005) Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *Int Microbiol*. 8, 195–204.
- Mata-Alvarez, J. (2003). Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA publishing. Londres, Inglaterra. Pp 1-180.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., Astals. (2011). Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology*. 31(2): 99–111.
- Mataix, J.F. (2011). *Tratado de Nutrición y Alimentación*. Edición ampliada. Vol.1 Cap.3, Hidratos de carbono, Cap. 4 Lípidos, Cap. 5 Proteínas y aminoácidos. España: Océano/Ergón.
- McCann, M.C., Carpita, N.C. (2015). Biomass recalcitrance: a multi-scale, multi-factor and conversion specific property. *Journal of Experimental Botany*. 66 (14), 4109-4118.
- Mehta, N., Ahlawat, S.S., Sharma, D.P., Dabur, R.S., (2015). Novel trends in development of dietary fiber rich meat products a critical review. *Journal of Food Science and Technology*. 52(2), 633-647.



- Naroznova, I., Møller, J., Scheutz, C. (2016). Characterisation of the biochemical methane potential (BMP) of individual material fractions in Danish source-separated organic household waste. *Waste Management*.
- Neves, L., Goncalo, E., Oliveira, R., Alves, M.M. (2008). Influence of composition on the biomethanation potential of restaurant waste at mesophilic temperatures. *Waste Management*. 28, 965-972.
- Neilson, A.H., Allard, A.S., Remberger, M. (1985). Biodegradation and Transformation of Recalcitrance Compounds. Swedish Environmental Research Institute. 30-77.
- Nielfa, A., Cano, R., Vinot, M., Fernández, E., Fdz-Polanco, M. (2015). Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste. *Process Safety and Environmental Protection*. (94), 180-187.
- Novarino, D., Zanetti, M.C. (2008). Anaerobic digestion of the municipal solid waste organic fraction. *Environmental Sanitary Engineering*. 17-20.
- Okamoto, M., Mihaya, T., Mizuno, O., Noike, T. (2000). Biological hydrogen potential of materials characteristics of the organic fraction of municipal solid wastes. *Water Science and Technology*. 41(3), 25-32.
- Paul, S., Dutta, A. (2018). Challenges opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *Resources, Conservation & Recycling*. 130, 164-174.
- Pecoraro, É., Manzani, D., Messaddeq, Y., and Ribeiro, S. J. (2008). Bacterial cellulose from glucanacetobacter xylinus: preparation, properties and applications. Monomers, polymers and composites from renewable resources, 369.
- Pecorini, I., Baldi, F., Carnevale, E.A., Corti, A. (2016). Biochemical methane potential tests of different autoclaved and microwaved lignocellulosic organic fractions of municipal solid waste. *Waste Management*. 56, 143-150.
- Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., De la Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., Fernández, B., Fernández-Polanco, M., Frigon, J.C., Ganesh, R., Kaparaju, P., Koubova, J., Mendez, R., Menin, G., Peene, A., Scherer, P., Torrijos, M., Uellendahl, H., Wierinckm, I., De Wilde, V. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 86(8), 1088-1098.
- Rogalinski, T., Ingram, T., and Brunner, G. (2008). Hydrolysis of lignocellulosic biomass in water under elevated temperatures and pressures. *The Journal of Supercritical Fluids*. 47.
- Ruiz, L. (2016). Fibra dietética: definición, beneficios y métodos de cuantificación. Tesis para obtener el grado de Química de Alimentos. Facultad de Química. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sanders, W. T. M. (2001). Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates. Tesis doctoral, Universidad de Wageningen, Holanda.
- Schievano, A., D'Imporzano, G., Malagutti, L., Fragali, E., Ruboni, G., Adani, F., 2010. Evaluating inhibition conditions in high-solids anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 101 (14), 5728-5732.
- SEDESOL, (2012). Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. México.
- SEMARNAT, (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2015. Consulta: <http://www.gob.mx/semarnat>.
- SENER, (2017). Secretaria de Energía. Programa Especial de Transición Energética 2017 2018. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5484916&fecha=31/05/2018](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5484916&fecha=31/05/2018).
- Schievano, A., D'Imporzano, G., Malagutti, L., Fragali, E., Ruboni, G., Adani, F. (2010). Evaluating inhibition conditions in high-solids anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 101 (14), 5728-5732.



- Schnürer, A., Jarvis, A. (2010). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish Waste Management U2009:03, Swedish Gas Centre Report 207. [http://www.emrg.it/Lezioni\\_Energia\\_Rinnovabile/Microbiological\\_handbook\\_for\\_biogas.pdf](http://www.emrg.it/Lezioni_Energia_Rinnovabile/Microbiological_handbook_for_biogas.pdf).
- Shah, F. A., Mahmood, Q., Shah, M. M., Pervez, A., Asad, S. A. (2014). Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-21.
- Soltani, A., Hewage, K., Reza, B., Sadiq, R., (2015). Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: a review. *Waste management*, 35(0).
- Spiridon, I., Popa, V. I. (2008). Hemicelluloses: major sources, properties and applications. Monomers, polymers and composites from renewable resources.
- Sun, Y., Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*. 83.
- Taherzadeh, M.J., Jeihanipour, A. (2012). Recalcitrance of lignocellulosic biomass to anaerobic digestion. In: Mudhoo A, *Biogas Production: Pretreatment methods for enhanced Anaerobic Technology*. 27-52.
- Taherzadeh, M.J., Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International Journal of Molecular Science*. 9, 1621-1651.
- Teghammar, A., Yngvesson, J., Lundin, M., Taherzadeh, M.J., Horvath, I.S. (2009). Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production. *Bioresource Technology*. 101, 1206-1212.
- Triolo, J.M., Sommer, S.G., Moller, H., Weisbjerg, M.R., Jiang, (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*. 102, 9395-9402.
- Triolo, J.M., Pedersen, L., Qu, H., Sommer, S.G. (2012). Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource Technology*. 125, 226-232.
- Tsapekos, P., Kougias, P.G., Vasileiou, S.A., Lyberatos, G., Angelidaki, I. (2016). Effect of micro-aeration and inoculum type on the biodegradation of lignocellulosic substrate. *Bioresource Technology*. 225, 246-253.
- UNEP, (2015). United Nations Environment Programme. Green economy report.
- VALORGAS, (2010). Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe. MTT Agrifood Research Finland. VALORGAS Project.
- Wagner, A.O., Lins, P., Malin, C., Reitschuler, C., Illmer, P. (2013). Impact of protein-, lipid- and cellulose-containing complex substrates on biogas production and microbial communities in batch experiments. *Science and the Total Environment*. 458-460, 256-266.
- Wan, C., Zhou, Q., Fu, G., Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. *Waste Management*. 31, 1752-1758.
- Xu, F., Wang, Z. W., Li, Y. (2014). Predicting the methane yield of lignocellulosic biomass in mesophilic solid-state anaerobic digestion based on feedstock characteristics and process parameters. *Bioresource Technology*. 173, 168-176.
- Yang, G., Zhang, P., Zhang, G., Wang, Y., Yang, A. (2015). Degradation properties of protein and carbohydrate during sludge anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 192, 126-130.
- Yu, Z., Jameel, H., Chang, H.M., Park, S. (2011). The effect of delignification of forest biomass on enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology* 2011, 102.



- 
- 
- Zhang, Y., Banks, C. J. (2013). Impact of different particle size distributions on anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*. 33 (2), 297-307.
- Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 98 (4), 929-935.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*. 42, 35-53.
- Zupancic, G. D., Grilic, V. (2012). Anaerobic treatment and biogas production from organic waste. *Management of organic waste*. Sunil Khanal (Ed). InTech, Rijeka, Croatia.





## ANEXOS

### Anexo A: Datos de obtención de muestra en Estación de Transferencia

En la tabla A.1 se muestra el número cada de camión elegido aleatoriamente, las placas del camión seleccionado, su procedencia, el peso total de los residuos recolectados, el peso neto, la altura obtenida dentro del tambo utilizado para contener los residuos y si el camión recolector contaba con un sistema de recolección selectiva al tener dos compartimentos o solo uno.

**Tabla A.1.** Camiones seleccionados para obtención de la muestra representativa

| No. de camión | Placas   | Procedencia | Peso (kg) | Peso neto (kg) | Altura (cm) | Compartimentos en camión |
|---------------|----------|-------------|-----------|----------------|-------------|--------------------------|
| 2             | 29-69-CE | Tlalpan     | 41        | 29.75          | 45          | 1                        |
| 4             | 56-24-CJ | Coyoacán    | 68        | 56.75          | 40          | 1                        |
| 11            | 68-14-CM | Tlalpan     | 84        | 72.75          | 45          | 2                        |
| 12            | 68-16-CM | Tlalpan     | 47        | 35.75          | 46          | 2                        |
| 17            | 64-79-CM | Coyoacán    | 70        | 58.75          | 43          | 1                        |
| 18            | 34-42-CF | Coyoacán    | 71        | 59.75          | 43          | 1                        |
| 22            | 34-78-CF | Coyoacán    | 57        | 45.75          | 39          | 1                        |
| 23            | 48-76-CJ | Coyoacán    | 60        | 48.75          | 38          | 2                        |
| 24            | 64-18-CM | Coyoacán    | 92        | 86.75          | 40          | 2                        |
| 27            | 87-84-CG | Coyoacán    | 39        | 27.75          | 38          | 1                        |
| 30            | 64-88-CM | Coyoacán    | 30        | 18.75          | 50          | 2                        |

#### *Determinación del peso volumétrico*

De acuerdo con la Norma NMX-AA-019-1985, el procedimiento para determinar el peso volumétrico es el siguiente: primero, se pesa el tambo vacío tomando este peso como la tara del recipiente. A continuación, se llena el recipiente hasta el tope con residuos sólidos homogeneizados obtenidos de las partes eliminadas del primer cuarteo. Se golpea el recipiente contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Nuevamente se agregan residuos hasta el tope, teniendo cuidado de no presionar al colocarlos en el recipiente; esto con la finalidad de no alterar el peso volumétrico que se pretende determinar. El cálculo del peso volumétrico se realiza mediante la siguiente formula:

$$Pv = \frac{P - T}{V}$$

Donde:

Pv= Peso volumétrico de los residuos orgánicos

P= Peso del tambo con residuos = 138.13 kg

T= Peso del tambo vacío = 11.25 kg

V= Volumen del recipiente = 0.2 m<sup>3</sup>

Por lo que, sustituyendo con los valores obtenidos en el muestreo, el peso volumétrico de los residuos recolectados es de 634.4 kg/m<sup>3</sup>.

$$Pv = \frac{138.13 \text{ kg} - 11.25 \text{ kg}}{0.2 \text{ m}^3} = 634.4 \text{ kg}$$



## Anexo B: Curvas de producción de biogás

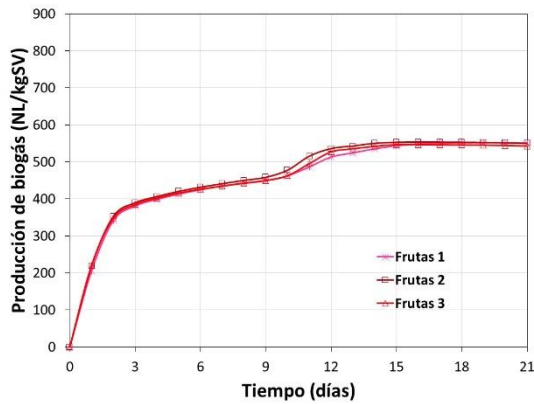


Figura B.1. Producción de biogás de frutas

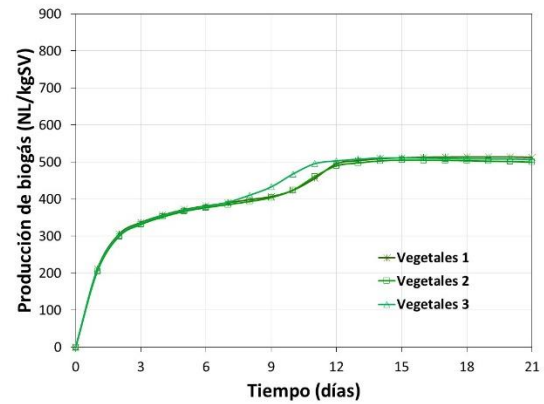


Figura B.2. Producción de biogás de vegetales

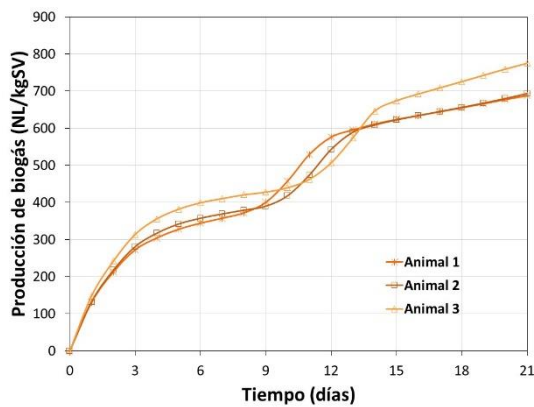


Figura B.3. Producción de biogás de residuos de origen animal

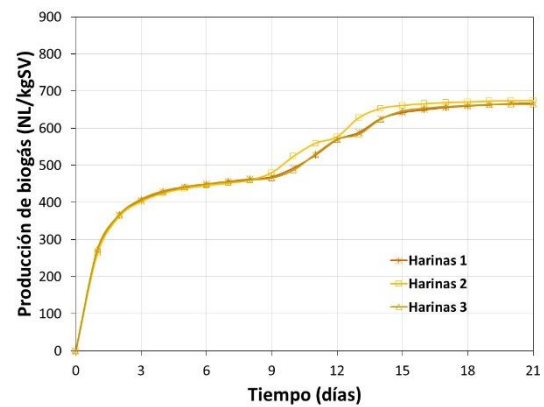


Figura B.4. Producción de biogás de harinas

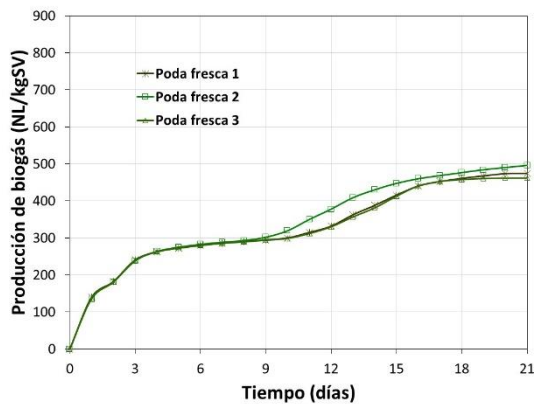


Figura B.5. Producción de biogás de poda fresca

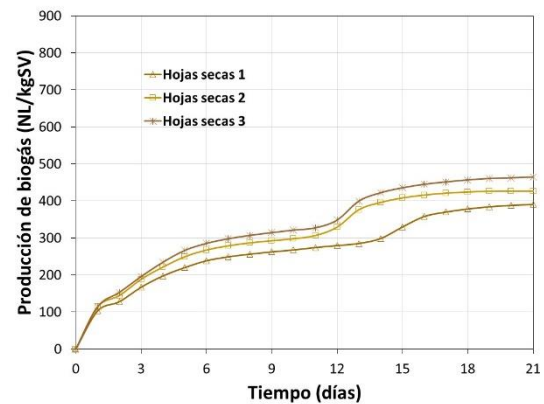


Figura B.6. Producción de biogás de hojas secas

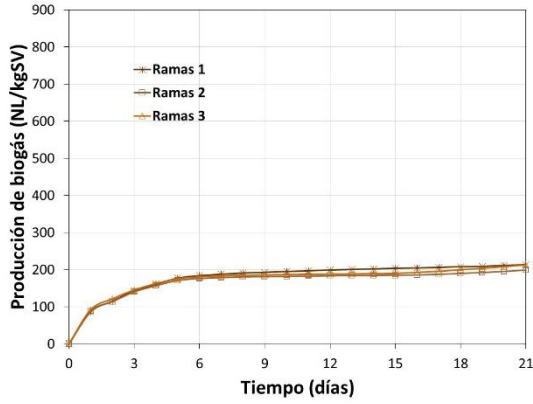


Figura B.7. Producción de biogás de ramas

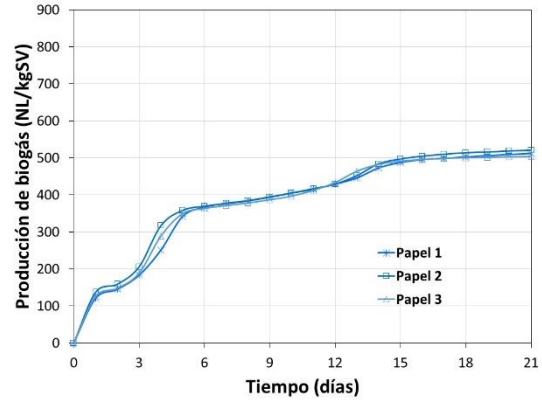


Figura B.8. Producción de biogás de papel

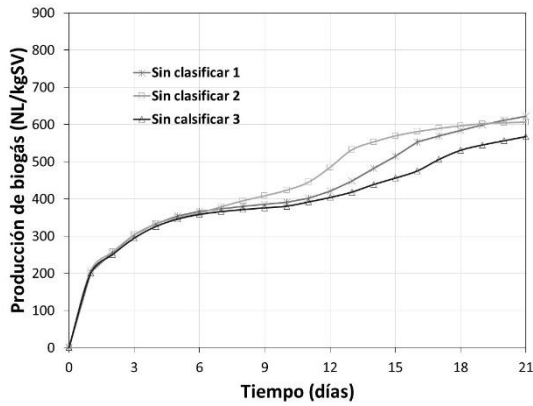


Figura B.9. Producción de biogás de residuos sin clasificar

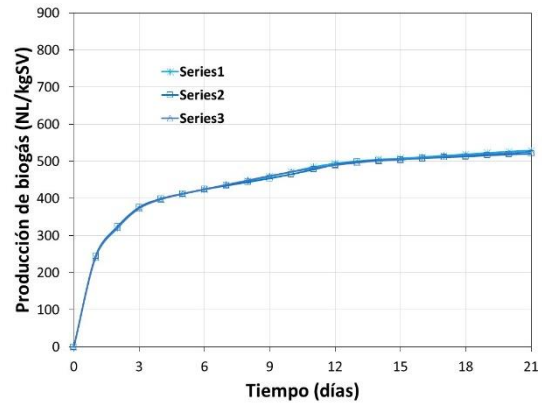


Figura B.10. Producción de biogás de FORSU

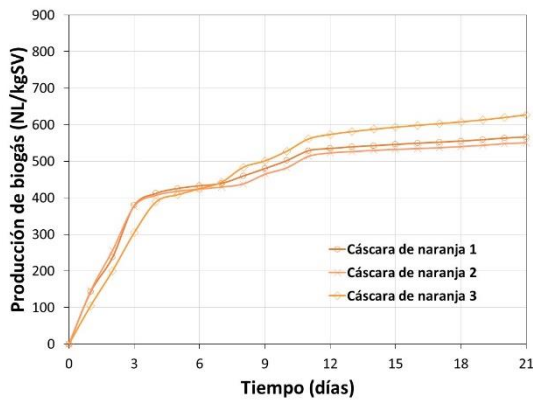


Figura B.11. Producción de biogás cáscara de naranja

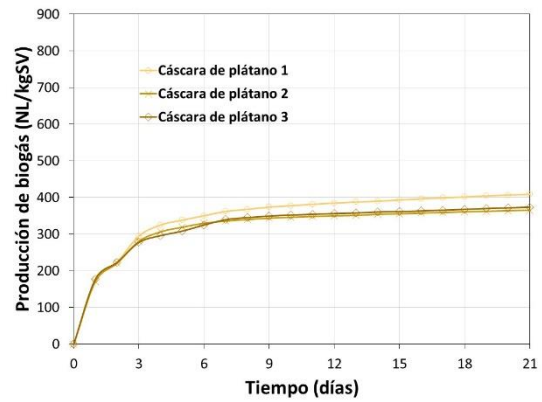


Figura B.12. Producción de biogás cáscara de plátano

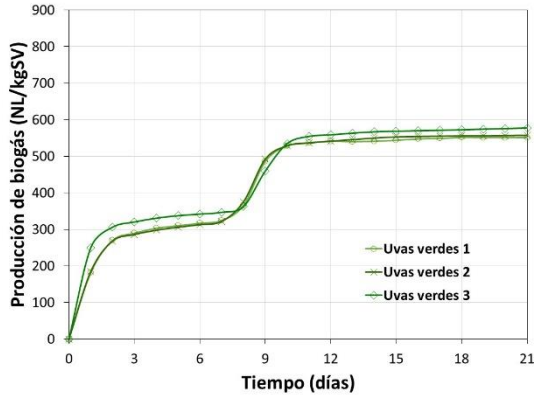


Figura B.13. Producción de biogás de uvas

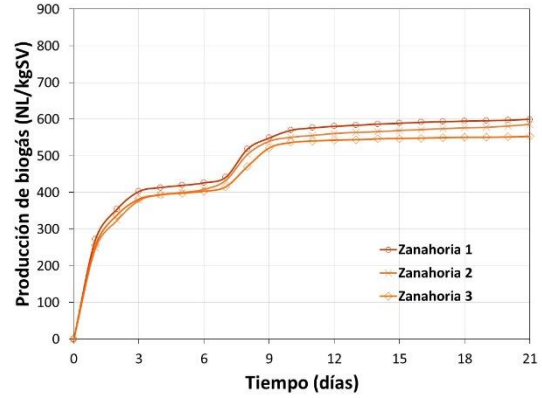


Figura B.14. Producción de biogás de zanahoria

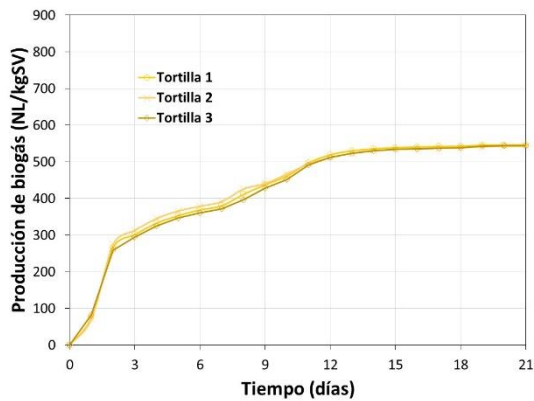


Figura B.15. Producción de biogás de tortillas

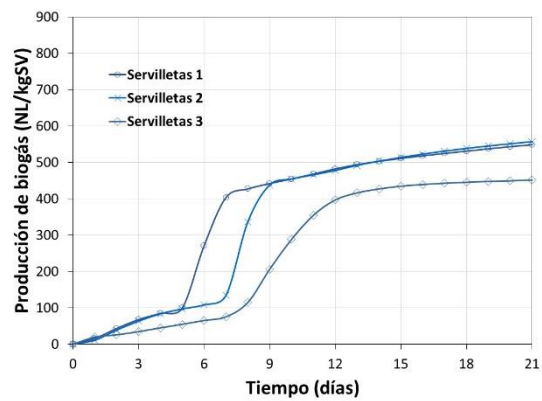


Figura B.16. Producción de biogás de servilletas

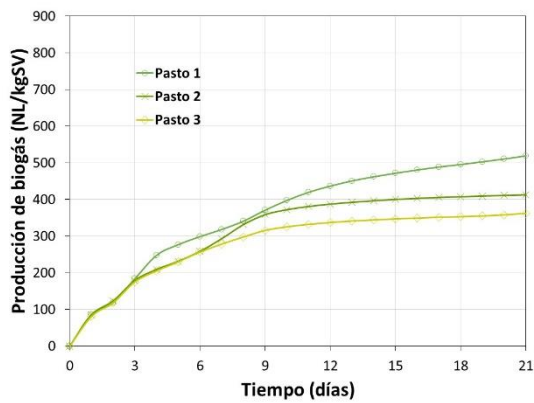


Figura B.17. Producción de biogás de pasto fresco

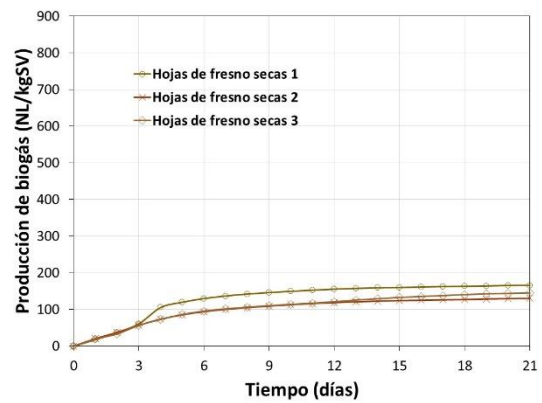


Figura B.18. Producción de biogás de hojas secas de fresco



## Anexo C. Curvas de producción de metano

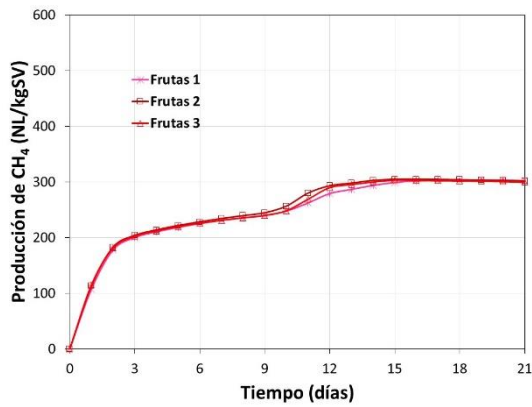


Figura C.1. Producción de metano de frutas

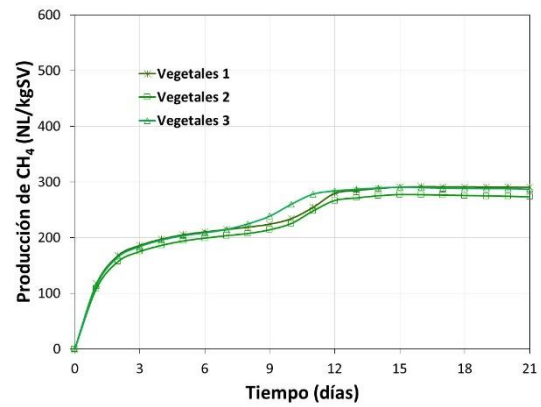


Figura C.2. Producción de metano de vegetales

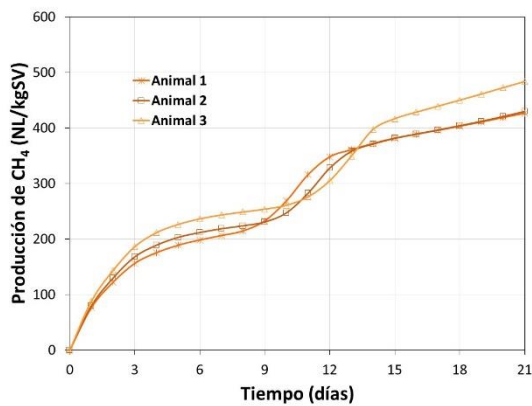


Figura C.3. Producción de metano de residuos de origen animal

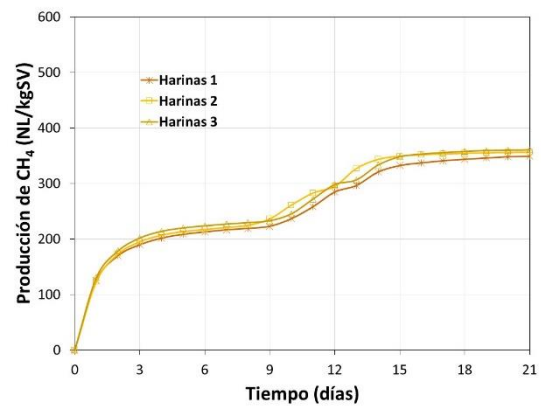


Figura C.4. Producción de metano de harinas

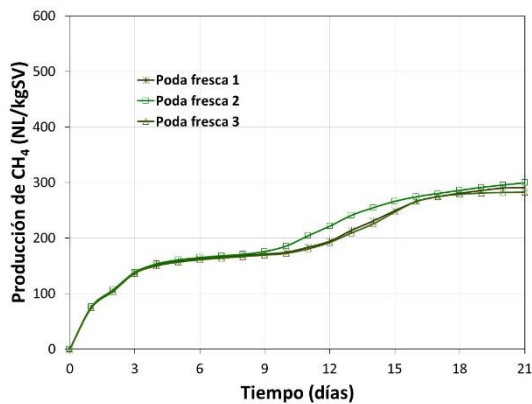


Figura C.5. Producción de metano de poda fresca

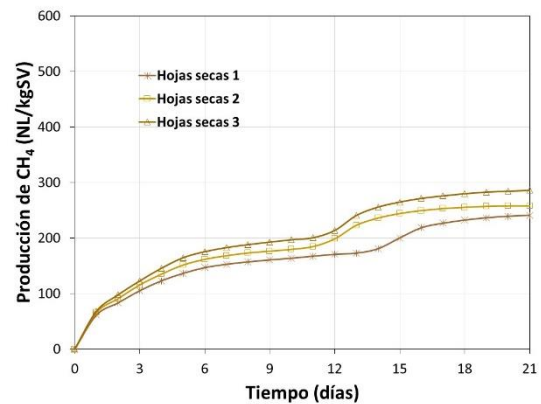


Figura C.6. Producción de metano de hojas secas

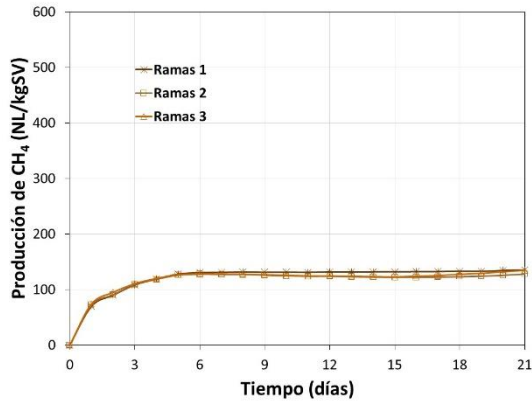


Figura C.7. Producción de metano de ramas

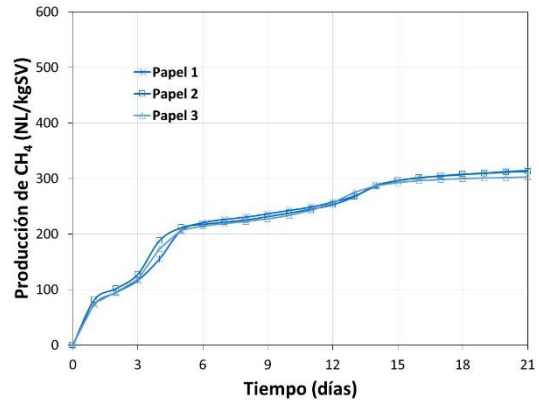


Figura C.8. Producción de metano de papel

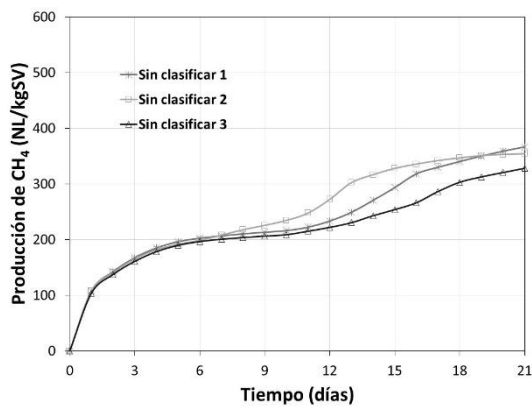


Figura C.9. Producción de metano de residuos sin clasificar

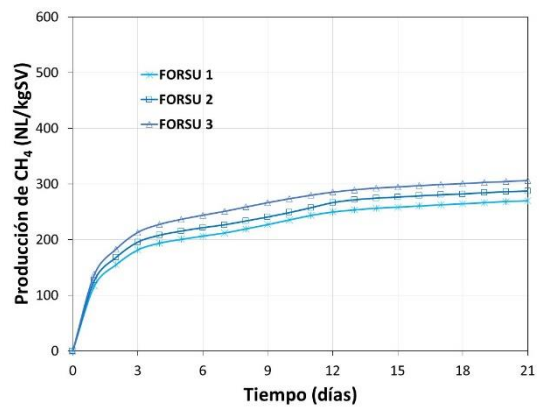


Figura C.10. Producción de metano de FORSU

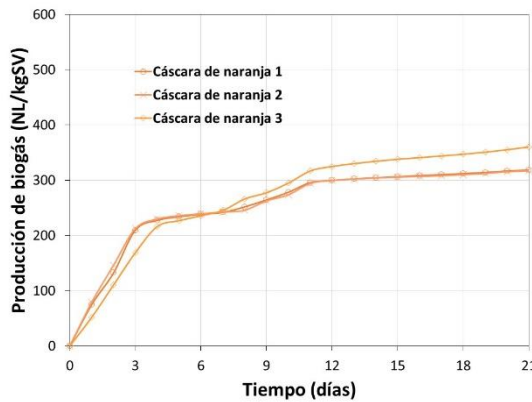


Figura C.11. Producción de metano de cáscara de naranja

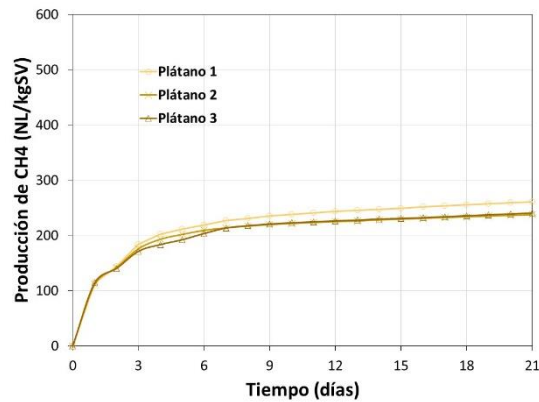


Figura C.12. Producción de metano de cáscara de plátano

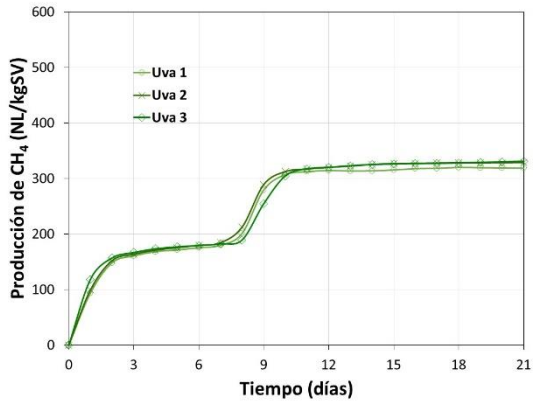


Figura C.13. Producción de metano de uvas

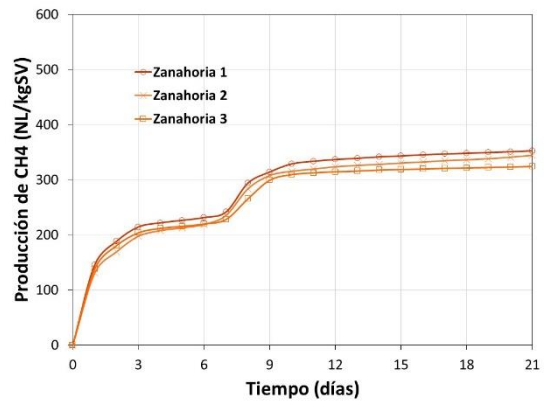


Figura C.14. Producción de metano de zanahoria

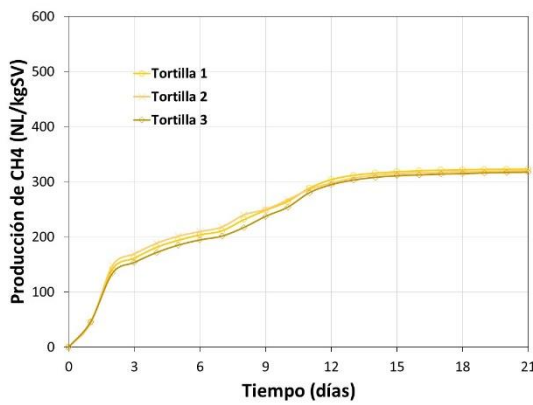


Figura C.15. Producción de metano de tortillas

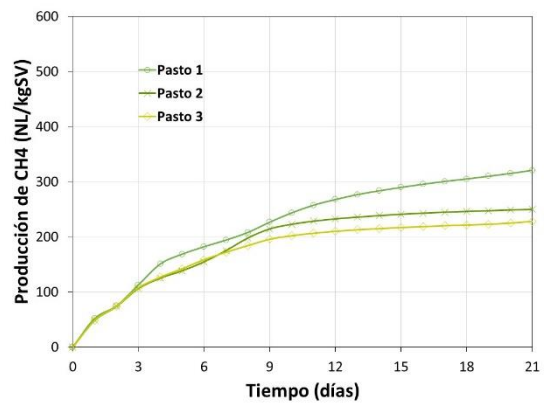


Figura C.16. Producción de metano de pasto fresco

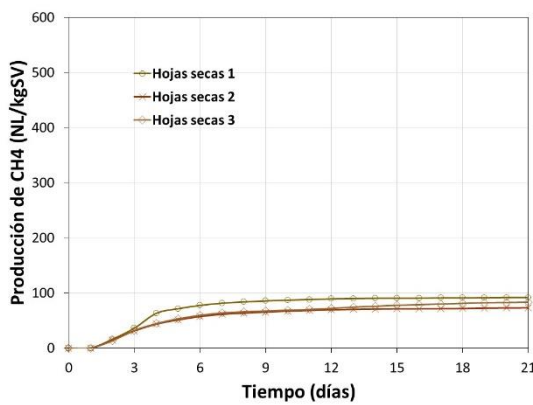


Figura C.17. Producción de metano de hojas secas de fresno

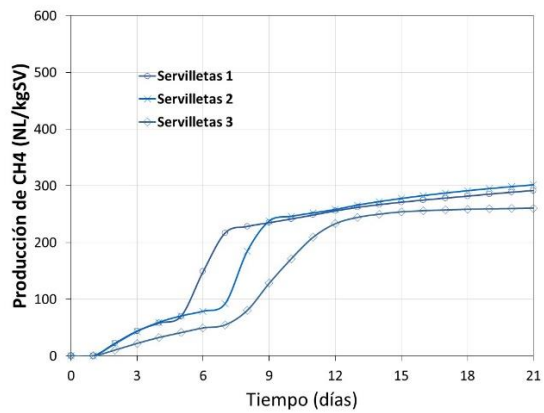


Figura C.18. Producción de metano de servilletas



## Anexo D. Análisis estadístico de sustratos

Se realizó un análisis descriptivo para determinar el comportamiento de la variable dependiente PBM y las variables independientes: carbohidratos degradables, proteínas, grasas, celulosa, hemicelulosa y lignina. La tabla D.1 muestra los estadísticos más importantes.

**Tabla D.1.** Estadística descriptiva

| Estadístico         | CD         | P        | G        | C         | H         | L         | PBM      |
|---------------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Media               | 364.25     | 73.625   | 85.625   | 127.875   | 131.875   | 82.875    | 274.75   |
| Mediana             | 239        | 59.5     | 102      | 43.5      | 112       | 23.5      | 302.5    |
| Desviación estándar | 392.361    | 62.953   | 40.071   | 224.906   | 149.780   | 116.771   | 84.503   |
| Varianza            | 153946.786 | 3963.125 | 1605.696 | 50582.696 | 22434.125 | 13635.554 | 7140.786 |
| Curtosis            | -1.960     | 5.019    | -0.284   | 7.436     | 3.550     | 2.990     | 4.463    |
| Asimetría           | 0.447      | 2.032    | -1.017   | 2.706     |           | 1.801     | -2.014   |
| Mínimo              | 1          | 9        | 14       | 20        | 2         | 4         | 83       |
| Máximo              | 883        | 218      | 123      | 678       | 461       | 336       | 340      |

CD: carbohidratos degradables, P: proteínas, G: grasas y aceites, C: celulosa, H: hemicelulosa y L: lignina

En cuanto al PBM, la tabla muestra que el valor mínimo es 83 que corresponde a hojas secas mientras que el máximo, 340, corresponde a zanahoria. Así mismo, la media es de 274.75 con una desviación estándar de 84.503. La media y mediana difieren por lo que el coeficiente de asimetría está por encima de 2, es decir, la distribución del PBM es asimétrica.

Las variables independientes que son de interés en este trabajo, celulosa, hemicelulosa y lignina, muestran que: celulosa tiene un valor mínimo de 20 (uvas) y máximo de 678 (servilletas) con una media de 127.875 y desviación estándar de 224.906, la media y mediana no son iguales por lo tanto su distribución es asimétrica.

La hemicelulosa tiene un valor mínimo de 2 (zanahoria) y un máximo de 461 (tortillas) con una media de 131.875 y desviación típica de 149.780. La lignina tiene un valor mínimo de 4 (tortillas) y un máximo de 336 (hojas secas) con una media de 82.875 y desviación estándar de 116.771, la distribución es asimétrica por lo que el coeficiente de asimetría es mayor a 1.

Las demás variables carbohidratos, proteínas y grasas se comportan de la siguiente manera: En carbohidratos, el valor mínimo corresponde a pasto fresco mientras que el máximo lo tiene la zanahoria. La media y mediana no son iguales, sin embargo, el coeficiente de asimetría es menor a 1 y además se observa una curtosis elevada. En proteínas, el valor mínimo corresponde a servilletas mientras que el valor máximo lo tiene el pasto fresco, la media y mediana no son iguales por lo que los coeficientes de asimetría y curtosis son elevados. En grasas, el valor mínimo corresponde a uvas, mientras que el valor máximo lo tienen las servilletas, la media y mediana no son iguales por lo que el coeficiente de asimetría es mayor a 1.





## Correlación

Para determinar la relación que existe entre las variables, se calculó el coeficiente de correlación con el fin de saber cuáles variables están relacionadas con el PBM y a su vez dichas variables deben ser independientes.

**Tabla D.2.** Matriz de correlación

|     | CD     | P      | G      | C      | H      | L      | PBM |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| CD  | 1      |        |        |        |        |        |     |
| P   | -0.250 | 1      |        |        |        |        |     |
| G   | -0.516 | 0.213  | 1      |        |        |        |     |
| C   | -0.419 | -0.277 | 0.458  | 1      |        |        |     |
| H   | -0.511 | 0.263  | -0.382 | -0.083 | 1      |        |     |
| L   | -0.145 | -0.275 | -0.071 | -0.240 | -0.053 | 1      |     |
| PBM | 0.468  | -0.046 | -0.443 | 0.027  | -0.016 | -0.722 | 1   |

CD: carbohidratos degradables, P: proteínas, G: grasas y aceites, C: celulosa, H: hemicelulosa y L: lignina

En la Tabla D.2 se puede observar que el PBM, variable dependiente, está directamente relacionada con la variable carbohidratos degradables (CD) ya que el coeficiente de correlación es 0.468. Mientras que inversamente relacionada con la variable lignina, su coeficiente de correlación es -0.722.

Así mismo, se muestra que la variable lignina tiene coeficientes de correlación bajos, es decir, no tiene relación con carbohidratos degradables (CD), proteínas (P), grasas (G), celulosa (C) y hemicelulosa (H). En cuanto a hemicelulosa (H), tiene relación inversa con carbohidratos degradables (CD) el coeficiente de correlación es -0.511. La celulosa tiene relación moderada con carbohidratos degradables (CD) y grasas.

## Modelos

A continuación, se realizó un modelo con las variables que en valores absolutos tienen mayor correlación con el PBM (Tabla D.3): carbohidratos degradables (CD), Grasas (G) y lignina (L).

**Tabla D.3.** Carbohidratos degradables (CD), Grasas (G) y lignina.

| Ecuación  | p-value (F) | ET     | R <sup>2</sup> |
|---|-------------|--------|----------------|
| PBM = 383.137 + 0.031 Carbohidratos – 0.886 Grasas<br>- 0.529 Lignina | 0.083       | 52.277 | 0.781          |

|               | Coefficientes | Error típico | Estadístico t |
|---------------|---------------|--------------|---------------|
| Intercepción  | 383.137       | 71.317       | 5.372         |
| Carbohidratos | 0.031         | 0.060        | 0.517         |
| Grasas        | -0.886        | 0.584        | -1.517        |
| Lignina       | -0.529        | 0.174        | -3.046        |



En la Tabla D.3 se puede observar que, al utilizar las variables anteriormente mencionadas, estas no son significativas debido a que su p-value es mayor 0.05. Por lo que a pesar de que en el análisis de correlación los carbohidratos, grasas y lignina están relacionadas con el PBM, estas no son determinantes en el modelo.

Posteriormente, se realizó un modelo general con todas las variables independientes: carbohidratos degradables, proteínas, grasas, celulosa, hemicelulosa y lignina. En la Tabla D.4 se puede observar que son significativos debido a que su p-value es menor a 0.05.

**Tabla D.4.** Regresión lineal con todas las variables independientes

| Ecuación   | p-value (F) | ET    | R <sup>2</sup> |
|--|-------------|-------|----------------|
| PBM = 977.185 – 0,367CD – 0,026 Proteínas – 4,113 Grasas – 0.091 Celulosa – 0.966 Hemicelulosa – 0.913 Lignina | 0.00013     | 0.015 | 0.99999        |

|                                  | Coefficientes | Error típico | Estadístico t | Probabilidad |
|----------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Intercepción</b>              | 977.185       | 0,09552      | 10229.863     | 0.000062     |
| <b>Carbohidratos degradables</b> | -0.367        | 0.00007      | -5550.133     | 0.000115     |
| <b>Proteínas</b>                 | -0.026        | 0.00014      | -195.393      | 0.003258     |
| <b>Grasas</b>                    | -4.113        | 0.00053      | -7700.902     | 0.000083     |
| <b>Celulosa</b>                  | -0.091        | 0.00005      | -1972.224     | 0.000323     |
| <b>Hemicelulosa</b>              | -0.966        | 0.00015      | -6379.259     | 0.000099     |
| <b>Lignina</b>                   | -0.913        | 0.00009      | -10326.242    | 0.000062     |

### Multicolinealidad

En este supuesto se comprueba si existe relación entre las variables independientes. Para ello se observó la matriz de correlación (Tabla D.2), y debido a que los coeficientes de correlación son bajos, se puede decir que el modelo no presenta problemas de multicolinealidad.

### Prueba de hipótesis

Se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existe diferencia entre **PBM** y **celulosa**.

#### 1) Se establecen las hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_4,$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_4$$

#### 2) Se elige el nivel de significancia

El nivel de significancia es del 5%, es decir  $\alpha = 0.05$

#### 3) Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$



Donde  $s^2$  es el estimador de la varianza común definido como:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Se calculó la media y varianza del PBM y celulosa  
Para el PBM la media es 274.75 y varianza 7140.79.  
Para celulosa la media es 127.88 y varianza 50582.70.  
Se sustituyeron los valores en la ecuación.

$$s^2 = \frac{(8 - 1) * 7140.79 + (8 - 1) * 50582.70}{8 + 8 - 2}$$
$$s^2 = 28861.74$$

Ahora se sustituye en t

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} = \frac{274.75 - 127.88}{\sqrt{\frac{28861.74}{8} + \frac{28861.74}{8}}}$$
$$t = \frac{146.87}{84.94} = 1.73$$

#### 4) Región de rechazo

La t tabulada es igual a  $t_{1-\alpha/2, (8+8-2)} = t_{0.975, 14} = 2.145$ . Si la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula.

#### 5) Decisión

Como la t calculada es menor a la t tabulada no se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, no existe relación entre las variables PBM y celulosa. Los promedios entre PBM y celulosa son iguales.

Se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existe diferencia entre el **PBM** y **hemicelulosa**

#### 1) Se establecen las hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_4,$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_4$$

#### 2) Se elige el nivel de significancia

El nivel de significancia es del 5%, es decir  $\alpha = 0.05$

#### 3) Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$



Donde  $s^2$  es el estimador de la varianza común definido como:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Se calculó la media y varianza de PBM y hemicelulosa

Para el PBM la media es 274.75 y varianza 7140.79.

Para hemicelulosa la media es 131.88 y varianza 22434.13.

Se sustituyeron los valores en la ecuación

$$s^2 = \frac{(8 - 1) * 7140.79 + (8 - 1) * 22434.13}{8 + 8 - 2}$$

$$s^2 = 14787.46$$

Ahora se sustituye en t

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} = \frac{274.75 - 131.88}{\sqrt{\frac{14787.46}{8} + \frac{14787.46}{8}}}$$

$$t = \frac{142.87}{60.80} = 2.34$$

#### 4) Región de rechazo

La t tabulada es igual a  $t_{1-\alpha/2, (8+8-2)} = t_{0.975, 14} = 2.145$ . Si la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula.

#### 5) Decisión

Como la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, existe relación entre las variables PBM y hemicelulosa.

Se realizó una prueba de hipótesis para determinar si existe diferencia entre **PBM** y **lignina**.

#### 1) Se establecen las hipótesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_4,$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_4$$

#### 2) Se elige el nivel de significancia

El nivel de significancia es del 5%, es decir  $\alpha = 0.05$

#### 3) Estadístico de prueba

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

Donde  $s^2$  es el estimador de la varianza común definido como:

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$



Primero se calculó la media y varianza de PBM y lignina  
Para PBM la media 274.75 y varianza 7140.79.  
Para lignina la media 82.88 y varianza 13635.55.  
Se sustituyeron los valores en la ecuación.

$$s^2 = \frac{(8 - 1) * 7140.79 + (8 - 1) * 13635.55}{8 + 8 - 2}$$

$$s^2 = 10388.17$$

Ahora se sustituye en t

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}} = \frac{274.75 - 82.88}{\sqrt{\frac{10388.17}{8} + \frac{10388.17}{8}}}$$

$$t = \frac{191.87}{50.96} = 3.77$$

#### 4) Región de rechazo

La t tabulada es igual a  $t_{1-\alpha/2, (8+8-2)} = t_{0.975, 14} = 2.145$ . Si la t calculada es mayor a la t tabulada se rechaza la hipótesis nula.

#### 5) Decisión

Como la t calculada es mayor a la t tabulada, existe evidencia estadística en la muestra para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, existe relación entre las variables PBM y lignina. Así mismo, las medias del PBM y lignina son diferentes.