



**UNIVERSIDAD DE MONTERREY**  
Vicerrectoría de Arte, Arquitectura y Diseño  
Escuela de Arquitectura y Ciencias del Hábitat  
Programa Académico de Ing. en Innovación Sustentable y Energía

**Programa de Evaluación Final**  
**Aprovechamiento de residuos orgánicos en localidades rurales**  
**del Sur de México: Digestión anaerobia a pequeña escala**  
En opción al título de  
Ing. en Innovación Sustentable y Energía

Integrante:  
Alejandra Jaramillo Cepeda                      339967

Asesora:  
Dra. María Guadalupe Paredes Figueroa

03 de diciembre, 2019  
San Pedro Garza García, N.L., México

## **AGRADECIMIENTOS**

A **INEGI**, que sin su apoyo una parte importante de este proyecto no hubiera sido posible. Gracias por su atención, su pronta respuesta y compartir microdatos del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007. Dichos facilitaron la elaboración de la primera fase de la herramienta de selección propuesta en el presente proyecto.

A la **Dra. Guadalupe Paredes Figueroa**, desde que llevé la primera clase contigo me quedé impresionada por tu dedicación, disposición y calidad en tus trabajos. Esto me motivó a solicitar tu asesoría en el Premio Xignux-UDEM, proyecto que concluimos exitosamente y donde mi admiración creció. Ahora, puedo decir que me siento sumamente afortunada de haber colaborado una vez más. Te agradezco infinitamente por recibirme cada semana, responder cada duda, escuchar mis inquietudes, exigirme a dar más, compartir tu conocimiento y por tu confianza en la elaboración de este proyecto de titulación. Gracias por inspirarme a la excelencia en mi trabajo. Me llevo muchos aprendizajes de ti, en el sentido personal y profesional. Espero que no sea nuestro último proyecto juntas.

Al **Dr. Carlos Escamilla Alvarado**, por su tiempo, recomendaciones y todas las correcciones a lo largo de la preparación de este trabajo. Especialmente por permitirme realizar una mini estancia en el Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, lugar donde logré ver en práctica los conocimientos adquiridos del proceso de digestión anaerobia y recibí sugerencias para mejorar mi investigación.

Al **Dr. Michael Morales Luna**, por su tiempo, compartir su experiencia y dar recomendaciones que ayudaron a mejorar este proyecto.

A **Luis Ángel Gómez Alejo** de INEGI, agradecida eternamente por el curso personalizado donde aprendí a manejar una la herramienta de Sistema de Información Geográfica, el Mapa Digital INEGI. Ésta fungió como el medio para obtener los primeros resultados de la investigación. Muchas gracias por su atención y constante asesoría durante el semestre.

## **DEDICATORIAS**

A **mis papás**, Alma y Enrique, por haberme forjado a la persona que soy ahora. Por enseñarme de disciplina, responsabilidad y dedicación, sin estos aprendizajes no estaría aquí. Gracias por su paciencia, sé que me desaparecí un poco durante la realización de este proyecto, pero el esfuerzo y los sacrificios han dado sus frutos. Con toda sinceridad, esto no habría sido posible sin ustedes.

A **Elwin**, a pesar de los 8,751 km de distancia me escuchaste a diario, me alentaste a dar lo mejor de mí y me acompañaste en cada paso de este proyecto. Agradezco tu paciencia y constante apoyo, no sólo durante este semestre, sino en estos (casi) dos años.

A mis amigos, **Eugenia, Michelle, Víctor, Leslie, Mariel, Kenya**, gracias por motivarme cuando más lo necesitaba, escuchar mis repetitivas quejas y apoyar hasta en los detalles. Los aprecio mucho. Infinitas gracias

# Índice General

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introducción</b>                                  | 9  |
| <b>2. Marco Teórico</b>                                 | 11 |
| 2.1 Residuos Sólidos                                    | 11 |
| 2.1.1 Generalidades                                     | 11 |
| 2.1.1.1 Tipos de Residuos                               | 12 |
| 2.1.2 Manejo Integral de Residuos Sólidos               | 13 |
| 2.1.2.1 Generación                                      | 15 |
| 2.1.2.2 Almacenamiento                                  | 16 |
| 2.1.2.3 Recolección                                     | 17 |
| 2.1.2.4 Tratamiento                                     | 17 |
| 2.1.2.5 Disposición Final                               | 18 |
| 2.1.3 Residuos Sólidos en México                        | 19 |
| 2.1.3.1 Normatividad                                    | 19 |
| 2.1.3.2 Gestión de Residuos en México                   | 20 |
| 2.1.4 Manejo de Residuos Sólidos en Localidades Rurales | 21 |
| 2.1.4.1 Casos de Estudio: GIRS en Zonas Rurales         | 23 |
| <b>3. Objetivo</b>                                      | 28 |
| 3.1 Específicos   | 28 |
| 3.2 Alcances y Limitantes                               | 28 |
| <b>4. Metodología</b>                                   | 30 |
| 4.1 Sistema de Información Geográfica                   | 31 |
| 4.2 Matriz de Selección                                 | 35 |
| <b>5. Desarrollo</b>                                    | 36 |
| 5.1 Digestión Anaerobia                                 | 36 |
| 5.1.1 Proceso   | 37 |
| 5.1.2 Productos   | 39 |
| 5.1.3 Variables de Operación                            | 41 |
| 5.1.4 Tipos de Biomasa                                  | 45 |
| 5.1.5 Tipos de Digestores                               | 47 |
| 5.2 Espacio geográfico                                  | 54 |
| 5.2.1 Regiones de México                                | 54 |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2.2 Índice de Desarrollo Humano                       | 59         |
| 5.2.3 Población en zonas rurales                        | 62         |
| 5.2.4 Pobreza   | 62         |
| 5.2.5 Acceso a Energía                                  | 63         |
| 5.2.6 Selección de región de estudio                    | 65         |
| <b>6. Herramienta de Selección</b>                      | <b>69</b>  |
| 6.1 Sistema de Información Geográfica                   | 69         |
| 6.1.1 Fracción orgánica de residuos sólidos municipales | 71         |
| 6.1.2 Estiércol de ganado                               | 72         |
| 6.1.3 Estiércol de ganado bovino                        | 73         |
| 6.1.4 Estiércol porcino                                 | 74         |
| 6.1.5 Estiércol de aves de corral                       | 75         |
| 6.1.6 Estiércol ovino                                   | 76         |
| 6.1.7 Cosechas y residuos de cosechas                   | 77         |
| 6.2 Criterios y Matriz de Decisión                      | 78         |
| 6.2.1 Generación  | 79         |
| 6.2.2 Gestión de residuos                               | 81         |
| 6.2.3 Clima y geografía                                 | 82         |
| 6.2.4 Operación   | 84         |
| 6.3 Matriz Técnica                                      | 90         |
| <b>7. Conclusiones</b>                                  | <b>99</b>  |
| <b>Glosario</b>   | <b>103</b> |
| <b>Bibliografía</b>                                     | <b>104</b> |
| <b>Anexos</b>   | <b>111</b> |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Ejemplo de la generación de residuos sólidos en localidades rurales en México por fracción.....  | 23 |
| <b>Tabla 2.</b> Datos analizados según el tipo de biomasa en el sistema de información geográfica.....   | 32 |
| <b>Tabla 3.</b> Producción de biogás por tipo de estiércol en México.....  | 46 |
| <b>Tabla 4.</b> Comparación de parámetros entre tipos de digestores.....   | 52 |
| <b>Tabla 5.</b> Ventajas y desventajas por tipo de digestor.....   | 53 |
| <b>Tabla 6.</b> Índice de Desarrollo Humano en los Estados Federativos de México en el 2015.....   | 60 |
| <b>Tabla 7.</b> Cantidad de Viviendas sin Acceso a Energía Eléctrica por Entidad Federativa.....   | 64 |
| <b>Tabla 8.</b> Porcentaje de población en zonas rurales, IDH, porcentaje de habitantes viviendo en pobreza y cantidad de viviendas sin acceso a energía por Entidad Federativa.....   | 65 |
| <b>Tabla 9.</b> Cantidad de Estados por región con IDH bajo, mayor población en localidades rurales, mayor población en situación de pobreza y menor población con acceso energía..... | 67 |
| <b>Tabla 10.</b> Interpretación de resultados de la matriz de decisión.....  | 78 |
| <b>Tabla 11.</b> Matriz de decisión para la correcta selección del proceso de digestión anaerobia.....   | 87 |
| <b>Tabla 12.</b> Variación en el TRH según el clima.....   | 90 |
| <b>Tabla 13.</b> Matriz técnica.....   | 95 |

## Índice de Figuras

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 1.</b> Jerarquía de residuos sólidos.....  | 13  |
| <b>Figura 2.</b> Fases de un Sistema Integral de Gestión de Residuos .....                           | 15  |
| <b>Figura 3.</b> Composición de residuos sólidos urbanos en México durante el 2012 .....             | 20  |
| <b>Figura 4.</b> Porcentaje de disposición final según el tipo de asentamiento. ....                 | 22  |
| <b>Figura 5.</b> Esquema del proceso de toma de decisión .....                                       | 30  |
| <b>Figura 6.</b> Esquema metodológico del proyecto .....   | 31  |
| <b>Figura 7.</b> Esquema metodológico del sistema de información geográfica .....                    | 32  |
| <b>Figura 8.</b> Mapa base: delimitaciones estatales y municipales de México. ....                   | 33  |
| <b>Figura 9.</b> Ejemplo de base de datos .....  | 34  |
| <b>Figura 10.</b> Esquema del proceso de digestión anaerobia. ....                                   | 38  |
| <b>Figura 11.</b> Contenido energético de residuos orgánicos. ....                                   | 40  |
| <b>Figura 12.</b> Estructura de digestor de mezcla completa. ....                                    | 47  |
| <b>Figura 13.</b> Diagrama de funcionamiento de digestor tipo flujo pistón. ....                     | 48  |
| <b>Figura 14.</b> Diagrama de digestor tipo lecho empacado. ....                                     | 49  |
| <b>Figura 15.</b> Diagrama de una laguna anaerobia cubierta. ....                                    | 50  |
| <b>Figura 16.</b> Diagrama de reactor anaerobio de flujo ascendente. ....                            | 51  |
| <b>Figura 17.</b> Regiones económicas de México .....  | 55  |
| <b>Figura 18.</b> Nivel de desarrollo humano por Entidad Federativa.....                             | 61  |
| <b>Figura 19.</b> Porcentaje de población habitando en zona rurales por Estado. ....                 | 62  |
| <b>Figura 20.</b> Porcentaje de habitantes viviendo en situación de pobreza por Estado. ....         | 63  |
| <b>Figura 21.</b> Proceso de herramientas para la toma de decisiones .....                           | 69  |
| <b>Figura 22.</b> Población en localidades rurales .....   | 71  |
| <b>Figura 23.</b> Población de ganado .....  | 72  |
| <b>Figura 24.</b> Distribución de población de ganado bovino (cabezas).....                          | 73  |
| <b>Figura 25.</b> Distribución de población de ganado porcino (cabezas).....                         | 74  |
| <b>Figura 26.</b> Distribución de población de aves de corral. ....                                  | 75  |
| <b>Figura 27.</b> Distribución de población ovina. ....  | 76  |
| <b>Figura 28.</b> Área cosechada (ha) por municipalidad .....  | 77  |
| <b>Figura 30.</b> Diagrama de flujo para planeación y diseño de un digestor .....                    | 97  |
| <b>Figura 31.</b> Diagrama de temas desarrollados.....   | 99  |
| <b>Figura 32.</b> Potencial de calentamiento global entre la disposición en relleno sanitarios ..... | 102 |

## **Resumen**

El aprovechamiento de residuos orgánicos mediante el proceso de digestión anaerobia tiene el potencial de ser una vía de desarrollo para localidades rurales del Sur de México; zona con mayor vulnerabilidad en el país. Utilizando los productos del proceso biológico, biogás y biofertilizante, las comunidades podrán abastecer sus necesidades de energía por una fuente renovable. Además, de contar con abono generado en sitio.

Con la intención de promover el uso de este proceso, una herramienta de selección fue desarrollada. La herramienta consiste en tres fases: mapas, matriz de decisión y matriz técnica. Los mapas fueron elaborados con el programa de Sistema de Información Geográfica, Mapa Digital de INEGI. Estos mapas funcionan como una guía visual del potencial de aprovechamiento de diferentes tipos de biomasa. Siguiendo, se encuentra la matriz de decisión. Esta combina datos cuantitativos y cualitativos para evaluar cuatro diferentes tipos de digestores ante trece parámetros. Su objetivo es facilitar la valoración de las alternativas. Por último, la matriz técnica reúne datos detallados para diversos parámetros y por medio de un diagrama de flujo conecta la lógica y conexión entre ellos al momento de diseñar un digestor.

La herramienta de selección está regionalizada a los tres Estados del Sur de México: Chiapas, Guerrero y Oaxaca. Su uso busca promover y facilitar la aplicación del proceso de digestión anaerobia en las localidades rurales en la busca de una mejora en la calidad de vida de las personas y una reducción de emisiones al medioambiente.

## 1. Introducción

Hasta ahora, la generación de residuos sólidos continúa siendo una problemática existente en entornos conurbados y rurales. Por cuestión de volumen, gran parte de los esfuerzos se han enfocado a la gestión integral en ciudades. Dejando un menor desarrollo en localidades rurales, donde efectivamente se cuenta con una menor generación que localidades urbanas, pero también con manejos no óptimos (Hilburn, 2015).

Una gestión integral de residuos sólidos selecciona técnicas, tecnologías y procesos para manejar estos materiales y reducir sus impactos al ambiente, riesgos a la salud humana y costos. Todo esto con la prioridad de reducir la mayor cantidad de residuos generados y que aquellos ya existentes, tengan el manejo más provechoso según su tipo en todas las etapas de su gestión (Tchobanoglous *et al.*, 1997).

En esta línea, el proceso de digestión anaerobia es una tecnología específicamente para residuos orgánicos en la etapa de tratamiento. Su potencial para mejorar condiciones sanitarias, ambientales, generar energía renovable y obtener un digestato o producto final que funciona como fertilizante, ha generado interés en utilizarse en localidades rurales. Especialmente para el aprovechamiento de sus productos, específicamente el biogás para la generación de calor y/o electricidad (Varnero, 2011).

Considerando las limitaciones de las localidades rurales y la carencia de su estudio (Taboada, 2013), el hecho de que la fracción mayoritaria de la generación nacional se compone de residuos orgánicos (SEMARNAT, 2015), aunado al potencial del proceso de digestión anaerobia para su tratamiento, se definió que el objetivo del presente proyecto fue elaborar una herramienta que auxilie los tomadores de decisiones del Sur de México a la correcta selección del proceso de digestión anaerobia como el tratamiento de residuos orgánicos en zonas rurales.

Como primer paso, se realizó una revisión bibliográfica considerando el proceso, productos, aplicaciones, variables de operación, tipos de biomasa y de reactores del proceso de digestión anaerobia. Al comparar y contrastar estas diferentes categorías de evaluación, se generarán

criterios de selección de las variaciones de diseño de la digestión anaerobia en diferentes entornos y particularidades de las localidades rurales.

Los criterios y parámetros generados se utilizaron para la elaboración de un “Sistemas Base” que consiste en tres etapas. Primeramente, mapas elaborados mediante un sistema de información geográfica representan gráficamente la ubicación de los diferentes tipos de biomasa y su potencial de aprovechamiento. Siguiendo, una matriz de decisión con parámetros de evaluación facilita la valoración y/o comparación de uno, dos o más tipos de digestores y su aplicación en un sitio determinado. Finalmente, una matriz técnica auxilia a expertos con las consideraciones especializadas por cada tipo de digestor.

La herramienta generada sirve como base para la toma de decisiones durante la planeación de una gestión integral de residuos sólidos en comunidades rurales, brindando una síntesis y juicio crítico de la información ya disponible.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Residuos Sólidos

#### 2.1.1 Generalidades

Los residuos sólidos son “todos los materiales sólidos o semisólidos que el poseedor no considera de suficiente valor como para ser retenidos” (Tchobanoglous *et al.*, 1997). El valor será definido según factores como: el tiempo, ubicación, estado del objeto, nivel de ingreso y las preferencias personales del poseedor (Christensen, 2010). Por lo tanto, un poseedor podrá considerar cierto material como residuo, mientras que en otro contexto podrá ser valorizado.

La generación de residuos depende principalmente de patrones de producción, hábitos de consumo y el crecimiento poblacional. Éste último es un factor de gran relevancia. La presión a producir y consumir dependerá de la demanda poblacional, que desde un panorama nacional, refleja una tasa de crecimiento poblacional aproximado de siete millones del 2010 al 2015 (INEGI, 2015). Dicha tendencia afecta la explotación de los recursos naturales e indirectamente la generación de residuos (Letcher & Vallero, 2011).

El patrón de producción ha sido constante por siglos y puede ser descrito como una progresión lineal o, en analogías, un método con desarrollo en cascada o de la cuna a la tumba (Letcher & Vallero, 2011). De esta manera se diseña y al final del uso hay una disposición final del producto, o también llamado residuo. La existencia de estos residuos implica riesgos y problemáticas. Su necesidad de espacio y manejo, incomodidades como olores, riesgo a la salud pública, costo en manejo y polución al medio ambiente ha causado que el objetivo principal sea disminuir la cantidad de generación, por ende, la carga que implica (Christensen, 2010).

En años recientes ha existido un cambio de paradigma con el cual han nacido métodos como el diseño de la cuna a la cuna y el diseño para el desensamble. El diseño de la cuna a la cuna considera que no hay residuos, que todo es alimento para otros ciclos y sólo hay que aprender a ubicarlos (McDonough & Braungart, 2005). Mientras que el diseño para el desensamble menciona que el producto debe ser considerado para su reparación y recuperación de materiales,

por lo que su estructura debe facilitar la división del objeto (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Estos métodos son un avance para el desarrollo sostenible, sin embargo, son insuficientes para la necesidad de un cambio sistemático y comprensivo de demanda de productos en la sociedad. (Letcher & Vallero, 2011).

#### 2.1.1.1 Tipos de Residuos

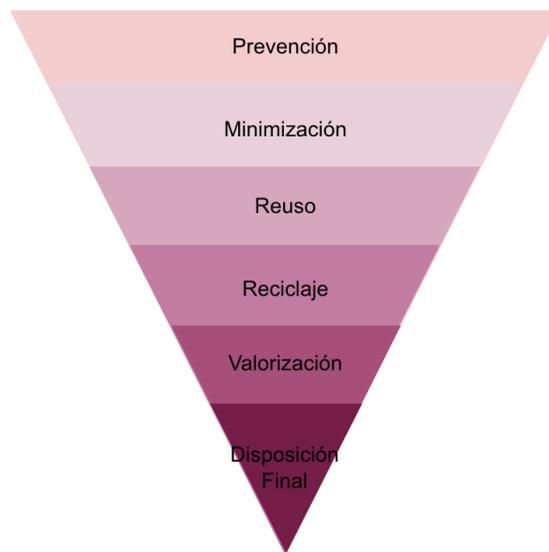
Según su origen y características, los residuos sólidos son clasificados en tres amplios grupos: residuos sólidos urbanos, residuos especiales y residuos peligrosos. Los residuos sólidos urbanos se definen en la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (2003) como todos aquellos que se generan por medio de actividades domésticas tal como los embalajes de productos utilizados en las casas habitación. Los productos encontrados en esta clasificación son subclasificados en orgánicos e inorgánicos. Los primeros incluyen residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, residuos de jardín y madera. La sección inorgánica son artículos como el vidrio, latas, cerámica, aluminio, y metales féreos. (Tchobanoglous *et al.*, 1997).

Los residuos de manejo especial incluye a todo aquel material no peligroso generado en actividades productivas o grandes generadores de residuos sólidos urbanos (DOF, 2003). Usualmente se incluyen artículos voluminosos, electrodomésticos, baterías, aceite y neumáticos y residuos de construcción (Tchobanoglous *et al.*, 1997) .

Mientras que los residuos peligrosos son aquellos que presentan un peligro actual o potencial a los seres humanos u otros organismos por diversos motivos; sea un material no degradable, letal, acumulativo biológicamente o de otra forma causar efectos perjudiciales acumulativos (Tchobanoglous *et al.*, 1997). Algunas propiedades que definen un residuo peligroso son la corrosividad, toxicidad o cancerogenicidad. Aunque en la definición nacional, cualquier material que tenga una característica corrosiva, reactiva, explosiva, tóxica, inflamable o biológica infecciosa (CRETIB) entrará como clasificación de residuo peligroso (DOF, 2003).

### 2.1.2 Manejo Integral de Residuos Sólidos

Una gestión integral de residuos sólidos (GIRS) implica la selección de técnicas, tecnologías y programas de gestión para lograr metas y objetivos del manejo de residuos (Tchobanoglous *et al.*, 1997). La jerarquía de prioridades durante la elaboración de un sistema de manejo de residuos sólidos, basados en la Agenda 2030 de la Visión Nacional Cero Residuos, incluye: la prevención, la minimización, el reuso, el reciclaje, la valorización y la disposición final, en orden de importancia (SEMARNAT, 2019) (Figura 1).



**Figura 1.** Jerarquía de residuos sólidos  
Adaptada de SEMARNAT (2019)

La prevención de generación de residuos se encuentra en el rango más alto debido a su posibilidad de reducir directamente la cantidad y/o toxicidad de los residuos, por ende, es la manera más eficaz de también reducir el costo de la gestión integral y sus impactos ambientales. La prevención puede realizarse por medio del diseño, fabricación, envasado o directamente en las viviendas, industrias y comercios por medio del hábito de consumo (Tchobanoglous *et al.*, 1997). Si la generación de un residuo se vuelve inevitable, el paso siguiente será su minimización. Durante esta segunda etapa se busca que el poseedor tome decisiones que disminuya la cantidad generada.

Una vez que la prevención y la minimización son aplicadas, entra la tercera posición jerárquica; el reuso del material en los residuos sólidos. La reutilización consiste en que el material no sea modificado y tenga utilidad. Existe la posibilidad de que el uso no sea el mismo para lo que fue diseñado, sin embargo, es válido ese cambio. Ejemplo de la aplicación del reuso de materiales es aplicar la retornabilidad y el rellenamiento (INECC, s/f).

El reciclaje, la cuarta prioridad, implica la separación de materiales, su preparación para reprocesamiento y transformación en nuevo productos. Su importancia yace en que se reduce la explotación de materias primas para obtención de nuevos productos y evita que el material sea dispuesto en algún vertedero. (Tchobanoglous *et al.*, 1997)

La quinta prioridad puede suceder de diferentes maneras. La valorización puede existir mediante la generación de energía con un incinerador o un sistema de digestión anaerobia. También, podrá pasar por procesos que no provean energía directamente, sino un producto, por ejemplo el compostaje.

Por último, la disposición final se refiere a aquella que no tenga recuperación de energía o material, como los rellenos sanitarios. Un destino sumamente común para los residuos sólidos, históricamente hablando (Christensen, 2010). Esto, debido a que ha sido una solución desde el comienzo de la industrialización. Las principales preocupaciones de esta tecnología son el manejo de lixiviados y las emisiones de metano y dióxido de carbono. Estas han impulsado la evolución de su ingeniería, sin embargo, continúa siendo una opción que necesita de remediación al largo plazo (Christensen, 2010).

Al analizar la jerarquía propuesta en la Visión Nacional Cero Residuos, es palpable la intención de priorizar la incorporación materiales al sistema económico con la menor energía posible. Por ello, la prevención es la primera prioridad mientras que las disposición final es la última. Aunque adicionalmente a esta jerarquía, Christensen (2010) presenta criterios que considera inapelables en una GIRS:

- Sea económicamente viable y justo
- Considere las normas y reglamentos de la zona
- Emita la menor contaminación a los diferentes medios del ambiente
- Genere trabajos justos y seguros
- Reduzca impactos (espacio, ruido, tráfico, derrames, etc.) en la vida de la zona
- Recupere la mayor cantidad de material sin inyectar tanta energía
- Incluya estructura arquitectónica y estética
- Provea una manipulación que considere el menor esfuerzo posible de los ciudadanos y los responsables del manejo

Si se analizan estos criterios, es posible identificar que en conjunto con la jerarquía de residuos sólidos, se describe y busca indirectamente el desarrollo sostenible. Uniendo el valor de ambos es posible concluir que la GIRS debe ser económicamente viable, cuide de la salud y bienestar de los habitantes y reduzca su impacto en el medio ambiente.

La jerarquía de prioridades y los criterios anteriormente presentados deben aplicarse a lo largo de las cinco fases que conforman las actividades generales de una GIRS (Harvey *et al.*, 2005). La importancia de una gestión ordenada y eficaz se debe a que facilita la evaluación del marco aplicado y brinda un ambiente controlado que permita su constante evaluación (Tchobanoglous *et al.*, 1997). Un diagrama de las cinco fases se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Fases de un Sistema Integral de Gestión de Residuos  
Elaboración propia con datos de Harvey *et al.* (2005)

### 2.1.2.1 Generación

La generación de residuos sólidos es el comienzo del sistema y donde los materiales son desvalorizados por sus poseedores. Esta etapa es poco controlable, la legislación es la única

restricción que puede tener poder de limitar la cantidad de residuos sólidos generados (Tchobanoglous *et al.*, 1997). Para el diseño de un sistema de gestión integral, la caracterización de la generación es requisito. Para ello, se requerirá obtener datos relacionados con la categoría, tipo, cantidades, fracciones y sustancias de los residuos sólidos (Christensen, 2010).

La categoría se refiere a la clasificación más general; residuos doméstico, comercial, industrial o de construcción. Posterior a la definición de una categoría, se seleccionará el tipo, una subclasificación según el origen y características similares. Al trabajar con residuos domésticos, subclasificaciones comunes son: residuos de comida, residuos de jardín y peligrosos domésticos. Siguiendo a estas clasificaciones y subclasificaciones, es la determinación de cantidades. En México, la Norma Mexicana NMX-AA-61-1985 establece determinar la generación de residuos domésticos en relación a kg/hab al día. Aunque al presentar datos estadísticos, es común mostrar la generación en lapsos anuales.

Los parámetros restantes, fracciones de materiales y sustancias, brindan mayor comprensión sobre la composición de los residuos sólidos. Las fracciones son agrupaciones con cualidades similares. Algunos ejemplos son: el papel, vidrio y residuos orgánicos de cocina. Mientras que las sustancias, se refiere al estudio de contenido de componentes químicos específicos, tales como el nitrógeno, carbono, proteína, agua, entre otros (Christensen, 2010).

#### 2.1.2.2 Almacenamiento

La segunda fase de una gestión integral de residuos sólidos consiste en la manipulación, almacenamiento y separación hasta antes de su recolección (Tchobanoglous *et al.*, 1997).

La separación o segregación implica colocar los residuos por tipo, fracción o subfracciones. La infraestructura para ello varía según el origen y tipo de residuos, sin embargo, para los residuos domésticos las bolsas plásticas, contenedores por unidad habitacional o por sector son los más comunes. Aunque también pueden existir centros o espacios públicos donde se pueden dejar los residuos (Christensen, 2010). La segregación se convierte en una actividad crítica. Afecta el

proceso de almacenamiento, e incluso define diferencias en tratamiento y/o disposición, según la separación (Tchobanoglous *et al.*, 1997).

Por otra parte, el almacenamiento se vuelve un punto de interés para cuidar la salud pública, la estética y los impactos a la zona (Tchobanoglous *et al.*, 1997). Los medios físicos utilizados y sus ubicaciones dependen de las necesidades identificadas en la generación, de las decisiones acerca de las técnicas a aplicar y de los objetivos del sistema de gestión.

#### 2.1.2.3 Recolección

La tercera fase involucra el transporte a partir del almacenamiento. No se considera solo la recolección sino también el trayecto hasta alguna estación de transferencia, instalaciones de procesamiento de materiales, o en el peor de los casos, directamente a un vertedero (Tchobanoglous *et al.*, 1997).

El transporte de los residuos sólidos es dividido en tres tipos: impulsado por humanos, impulsado por animales y motorizado (Harvey *et al.*, 2005). Su elección dependerá de la cantidad de residuos y la disponibilidad de medios. Para localidades urbanas con altos números de población, el transporte motorizado es el más común (Tchobanoglous *et al.*, 1997). De manera opuesta, localidades rurales o localidades con menor tamaño podrán preferir alguno de los otros dos tipos.

#### 2.1.2.4 Tratamiento

La intención de la fase de tratamiento es la recuperación de reciclables, energía o mejorar las características de los residuos; por ejemplo, remover impurezas, olores, reducir volumen. Los tratamientos o trenes de tratamiento pueden ser térmicos, biológicos, mecánicos, o bien, una combinación de estos (Christensen, 2010).

El tratamiento mecánico se utiliza para clasificar, reducir volumen o compactar. Su aplicación es meramente física, no química. Tecnologías en el tratamiento mecánico incluyen clasificadores de aire y separadores magnéticos por mencionar algunos. El tratamiento mecánico puede aplicarse como tratamiento anterior o posterior a los térmicos y/o biológicos. Aunque, cuando la planta sea exclusivamente para la separación de reciclables se le conoce como un *material recovery facility (MRF)* o planta de selección de residuos sólidos (Christensen, 2010).

Por otro lado, el tratamiento térmico consiste en aplicar altas temperatura para lograr la combustión de los residuos sólidos y modificar sus características tanto físicas como químicas. Procesos comunes son la pirólisis/gasificación y la incineración. La incineración es la combustión con exceso de oxígeno que causa casi una oxidación completa y convierte el carbón orgánico a dióxido de carbono. Mientras que la pirólisis es una oxidación parcial que genera gases, utilizados posteriormente como combustible. La gasificación es un proceso realizado con altas temperaturas que genera gases con alto contenido energético. Todos los tratamientos térmicos producen gases que deben pasar por procesos energéticamente intensivos para controlar emisiones y evitar contaminación posterior (Tangri & Wilson, 2017). Así mismo, estos procesos tienen cenizas como residuos (Christensen, 2010).

El tratamiento biológico incluye la composta, el proceso de digestión anaerobia y/o una combinación de ambas. La primera consiste en un proceso aerobio donde se convierte el contenido orgánico en dióxido de carbono y sólidos estables (Christensen, 2010). La digestión anaerobia es contraria a la composta, ya que no requiere de oxígeno utilizando microorganismos para descomponer la materia orgánica y producir biogás; una mezcla de dióxido de carbono y metano. Las razones por la cual la digestión anaerobia es preferida sobre el compostaje es que funciona en sólidos y líquidos, cuando la composta sólo es funcional en materia orgánica sólida. Además, la digestión anaerobia tiene procesos más rápidos y no requiere energía para transportar los residuos ni para mantener el sistema aerobio (Frear, 2013).

Ambos procesos biológicos pueden mezclarse mediante el compostaje del digestato, el producto sólido del proceso de digestión anaerobia. Usualmente se recurre a los dos tratamientos cuando se busca la estabilización de los sólidos y mejorar sus cualidades para la mejora física del suelo (Suárez, 2012).

#### 2.1.2.5 Disposición Final

El elemento final de una GIRS consiste en la disposición final. Está sucede típicamente en vertederos o también llamados rellenos sanitarios. Todo material que no fue reducido, aprovechado para energía o reciclado llegará a una instalación ingenieril para ubicar los residuos sólidos en el suelo cuidando la salud pública y el medio ambiente (Tchobanoglous *et al.*, 1997).

Aunque hay sitios que podrán ser controlados y cumplan todas las especificaciones de un relleno sanitario a excepción de su impermeabilización; a estos se les conoce como sitios controlados (DOF, 2003). Mientras que el sitio no controlado, el método menos deseado, es aquel sitio de disposición final que no cumple con los lineamientos establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

La vida útil de un relleno sanitario puede ser de hasta décadas y su diseño variará según el tipo de residuo que recibirá y el tiempo que tardará en integrarse al ambiente y no requiera más procesos de seguimiento (Christensen, 2010).

### 2.1.3 Residuos Sólidos en México

#### 2.1.3.1 Normatividad

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos expresa en su Artículo 115 que la gestión de residuos sólidos compete a los municipios. Por lo que cada uno de ellos elaborará su plan de gestión independientemente. Así mismo, la Ley General para Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos coordina las funciones de las partes y establece el marco legal junto con múltiples normas. Entre ellas, se pueden mencionar las siguientes:

#### Normas Oficiales Mexicanas

NOM-083-SEMARNAT-2003: Rige la disposición final clasificando los sitios según la cantidad dispuesta diaria. Expresa especificaciones con lineamientos de ubicación, análisis previos, compactación de los residuos, obras complementarias requeridas, funcionamiento y mantenimiento, según la clasificación del sitio.

NOM-098-SEMARNAT-2002: Define las características y procesos adecuados para la incineración de residuos. Especifica responsabilidades, modo de operación, el método de medición de emisiones, frecuencia de medición y los límites permisibles.

#### Normas Mexicanas

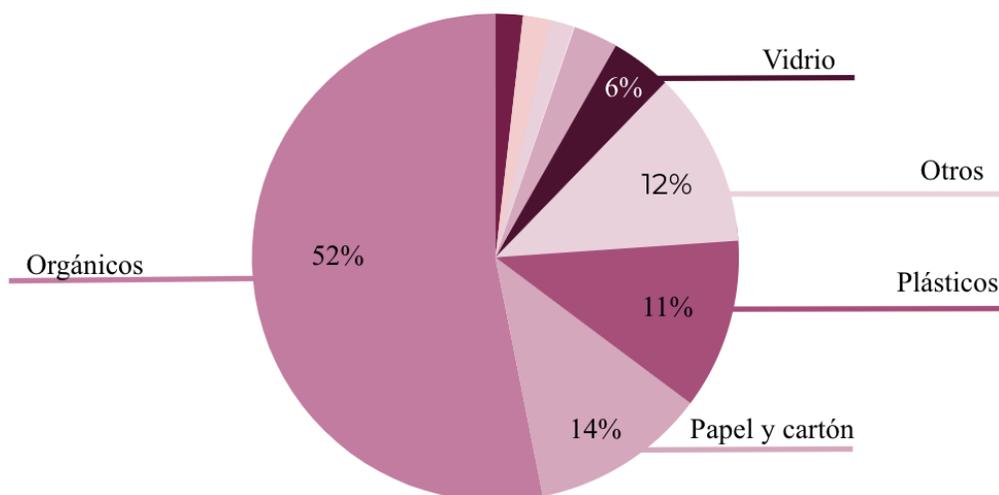
NMX-AA-15-1985: Establece el método de cuarteo para los residuos sólidos urbanos. Define los aparatos y equipos, procedimientos, el marcado y contenido del informe de campo.

NMX-AA-22-1985: Describe y sugiere la separación de subproductos de los residuos. Especifica aparatos y equipos, la obtención de la muestra, la cuantificación y los detalles para la elaboración del reporte.

NMX-AA-61-1985: Norma que auxilia el proceso de determinación de la generación. Especifica procedimiento en campo, tamaño de universo y de muestra, e incluye una cédula guía de encuesta.

### 2.1.3.2 Gestión de Residuos en México

La generación de residuos sólidos urbanos en México registró un aumento de 61.2% entre 2003 a 2015, calculando un total de 53.1 millones de toneladas durante el 2015 y hasta un promedio diario de 1.2 kilogramos per cápita (SEMARNAT, 2015). La composición de estos residuos consiste en más de su 50% por orgánicos, seguido del papel con un 13% y los plásticos con un 10% de la generación total, ver Figura 3.



**Figura 3.** Composición de residuos sólidos urbanos en México durante el 2012  
Adaptada de SEMARNAT (2015)

A nivel nacional, un poco más del 90% de la población mexicana cuenta con servicio de recolección de residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, 2015). La recolección se realiza vía

vehículos compactadores y de caja abierta. Sólo el 15% de estos vehículos cuentan con separadores para recolectar de manera selectiva desde el origen. Una tasa sumamente baja considerando el 45% de los hogares mexicanos separan los residuos. El 55% restante prefieren no hacerlo principalmente por la percepción de que será mezclada una vez recogida (INEGI, 2018)

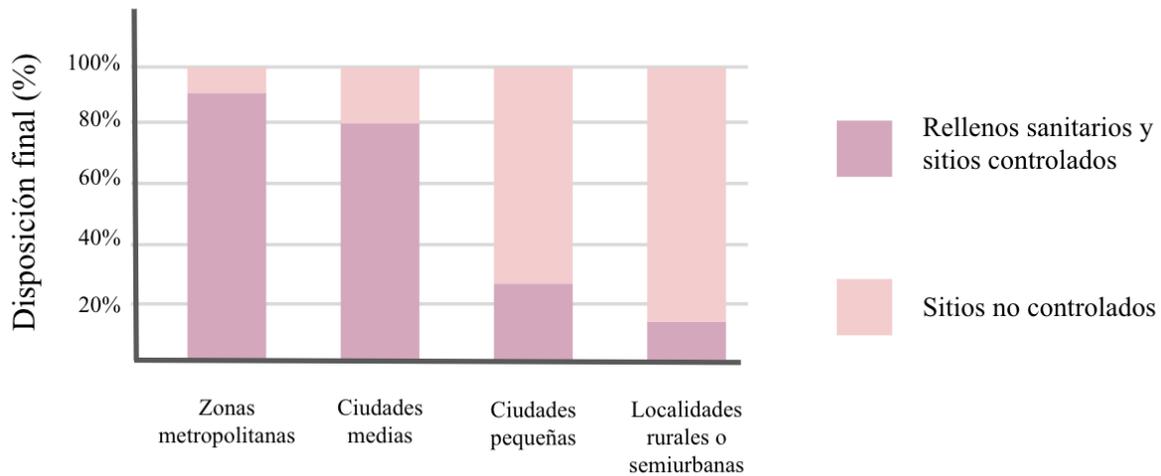
La recolección de residuos sólidos urbanos en casi su totalidad es de casa en casa. Esto quiere decir que cada vivienda cuenta con su propio contenedor. El camión y el personal del servicio de recolección verterán individualmente cada uno de los contenedores en los camiones. Solo en el 4% de los casos, existe un contenedor general para múltiples viviendas (INEGI, 2018).

El 65% de estos residuos son depositados en rellenos sanitarios. El resto se calcula que es dispuesto de manera inadecuada en sitios no controlados. El motivo detrás de la popularidad de los sitios de disposición final no controlados es una mala organización gubernamental, o bien, los altos costos de gestión (Velasco, 2011). Mientras la generación de residuos sólidos siga en incremento, el sistema de manejo tendrá que adaptarse simultáneamente; significando una mayor responsabilidad para las tres órdenes de gobierno, que son a quienes compete su gestión integral, según la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (DOF, 2003).

#### 2.1.4 Manejo de Residuos Sólidos en Localidades Rurales

El hecho de que casi el 90% de la generación de residuos en México provenga de ciudades (SEMARNAT, 2012), ha focalizado la atención hacia la gestión en las zonas conurbadas, dejando un poco atrás a las localidades rurales; zonas con poblaciones de 2,500 habitantes o menos.

Como se observa en la Figura 4, es notable que las localidades rurales o semiurbanas tengan una menor cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios y sitios controlados que las zonas metropolitanas; presentando una diferencia significativa del 80%.



**Figura 4.** Porcentaje de disposición final según el tipo de asentamiento.  
Adaptada de SEMARNAT (2012)

Cuando las zonas rurales no son accesibles, no son lo suficientemente evaluadas para la gestión de residuos o simplemente no encajan en un modelo tradicional, existe la posibilidad de que los municipios no atiendan la responsabilidad que les compete en su totalidad (Hilburn, 2015). Lo cual conlleva una desventaja para las comunidades, posicionándolas a enfrentar las problemáticas de los residuos mediante su experiencia.

La respuesta de localidades rurales ante la gestión de residuos sólidos usualmente consiste en prácticas como tiraderos a cielo abierto o la quema incontrolada. Ésta última siendo de alta preocupación debido a su potencial de contribución al Cambio Climático, quince veces mayor la generación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) que en un manejo vía sitio controlado (Reyna-Bensusan *et al.*, 2018). Además, al no contar con una GIRS, las localidades rurales no solo pierden la oportunidad de reducir sus impactos ambientales, sino también la posibilidad de revalorizar los residuos sólidos, reducir los riesgos a su salud, controlar la estructura estética de su comunidad, entre muchos otros beneficios que una gestión apropiada pueda tener.

La generación de residuos sólidos municipales en localidades rurales puede variar de comunidad a comunidad. En la Tabla 1 se presenta la generación de residuos sólidos de tres comunidades de

dos estados diferentes: San Quintín y Vicente Guerrero en Baja California y Montecristo de Guerrero en Chiapas. Para las localidades de Baja California también se incluye el porcentaje de contenido por fracción: residuos alimenticios, papel y cartón, plástico y vidrio.

**Tabla 1.** Ejemplo de la generación de residuos sólidos en localidades rurales en México por fracción.

| Zona                               | Residuos Alimenticios (%) | Papel y cartón (%) | Plástico (%) | Vidrio (%) | Generación (Kg/per cápita/día) | Fuente                                |
|------------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------|------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| San Quintín, Baja California       | 25.81                     | 16.47              | 15.95        | 2.57       | 1.171                          | Taboada-González <i>et al.</i> , 2010 |
| Vicente Guerrero, Baja California  | 24.40                     | 15.98              | 15.99        | 3.46       | 0.732                          | Taboada-González <i>et al.</i> , 2010 |
| Montecristo de Guerrero, Chiapas * | -                         | -                  | -            | -          | 0.564                          | Araiza <i>et al.</i> , 2018           |

Al analizar los datos de la Tabla 1 es evidente las variaciones entre las 3 comunidades. La población en San Quintín genera el doble de residuos sólidos que Montecristo de Guerrero, 1.17 kg/per cápita/día contra 0.564 kg/per cápita/día, respectivamente. Mientras Vicente Guerrero es un punto intermedio entre ambos con una generación de 0.73 kg/per cápita/día. Adicionalmente, observando el porcentaje de cada fracción en las localidades de Baja California, es rescatable que la generación de residuos alimenticios son el 25% del total generado. Un porcentaje menor a la media nacional de generación de residuos orgánicos del país, que es 52% como lo visto en la Figura 3.

#### 2.1.4.1 Casos de Estudio: GIRS en Zonas Rurales

##### Texcoco, México

Del 2000 al 2013, se llevaron a cabo acciones para reducir la dependencia de localidades rurales y urbanas de Texcoco hacia insumos externos a la región. Por medio de experiencias, se promueve el uso del compostaje para la generación de abono en actividades principalmente agrícolas (Quispe-Limaylla, 2016).

Las acciones tomadas comenzaron con la consulta de las comunidades, elaborando una estrategia que tenga el dictamen de las poblaciones y así una participación más efectiva. En el presente proyecto, los jefes de familia aprendieron a realizar lombricomposta por medio de la práctica. Posterior a ello, se proporcionaron instrucciones para la elaboración de un compostero de bajo costo y alta utilidad. En este caso, los materiales principales fueron cemento, tabicón, y lombrices rojas californianas (Quispe-Limaylla, 2016).

Los resultados del esfuerzo fue el tratamiento de hasta 3,500 kg de residuos orgánicos al mes; generación de un aproximado de 260 familias. La separación se realizaba en sitio y en algunos puntos se localizaba un compostero comunitario (Quispe-Limaylla, 2016).

#### El Playón, Colombia

En El Playón, una zona llamada Aguas Calientes con habitantes de localidades rurales viven del cultivo del cacao. Las tierras de difícil acceso, también presentan problemas con el suministro de energía eléctrica. Por lo tanto, Martínez & Garrido-Silva (2015) estudiaron la posibilidad de utilizar biomasa para el funcionamiento de vehículos eléctricos para la recolección del cacao, intentando facilitar la labor de los trabajadores debido a lo complicado del terreno en la zona.

El proyecto se desarrolla en tres fases. Durante la primera se realiza la caracterización fisicoquímica de los sustratos estudiados, la segunda consiste en seleccionar los parámetros para el diseño del digestor y finalmente el diseño de la estación de carga (Martínez & Garrido-Silva, 2015).

Dentro de los resultados relevantes, se determina que la viabilidad de utilizar estiércol porcino es más alta que el uso de estiércol de gallinas debido a que la última requería la adición de líquido y desafortunadamente El Playón no cuenta con lluvias frecuentes. El estiércol porcino, al colocarse en un reactor anaerobio por ciclos de 30 días aproximadamente, se estima la generación de la carga diaria de las baterías durante seis horas (Martínez & Garrido-Silva, 2015).

San Mateo Ixtatán, Guatemala

Ocho comunidades rurales en la zona de San Mateo Ixtatán en Guatemala presentaban problemas con la calidad del agua potable, manejo de residuos sólidos urbanos y el tratamiento de aguas residuales. Aún cuando la gestión integral de residuos sólidos le compete al gobierno, la infraestructura y recursos dirigidos eran insuficientes para garantizar la salud de los habitantes y el medio ambiente. Por ello, Zarate *et al.* (2007) elabora un plan de gestión seccionado en dos partes para promover la educación del tema ante la población y conducir a una cuantificación y clasificación de la generación.

La primera parte del programa consiste en actividades teóricas y prácticas con una duración de dos semanas. Durante el comienzo a la finalización del curso, la participación de la comunidad aumentó en un 50%. Las temáticas abordadas incluyen el análisis sanitario del manejo de residuos sólidos, la cuantificación de la generación, la clasificación de ellos, la discusión de un nuevo sitio para disponer los residuos que actualmente se colocaban en un tiradero a cielo abierto y la creación de contactos con autoridades locales para la obtención de mejores resultados (Zarate *et al.*, 2007).

La segunda parte tuvo una duración de tres meses, dando continuidad a las actividades de la primera parte. Los resultados obtenidos fueron el peso y volumen por clasificación de orgánicos, bolsas de plástico, empaques de plástico, botellas de plástico, latas, papel, cartón y vidrio; generando información para la selección herramientas y logística en cada de las etapas que consiste la gestión integral de residuos sólidos (Zarate *et al.*, 2007).

Una participación más activa de todos los grupos de interés y datos de la generación en las comunidades no fueron los únicos resultados del caso de estudio. El comienzo e interés en el tema fue un inicio relevante para la mejora de calidad de vida de estas zonas en marginación (Zarate *et al.*, 2007).

Hangzhou, China

Debido a la baja población y pobreza en las zonas rurales en China, muchas localidades envían los residuos a plantas de tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Aunque, con el rápido crecimiento poblacional, los sistemas de gestión integral de residuos sólidos urbanos se vuelven insuficientes para el manejo de la totalidad de los residuos. Por ello, Li et al., (2019) estudian y proponen un plan de gestión para las localidades rurales en la zona de Hangzhou.

Primeramente, se aplican encuestas en las siete localidades en estudio para identificar la cantidad de generación junto con el porcentaje de cada fracción y el escenario de gestión actual. Encontrando que existen principalmente tres escenarios diferentes en estructura pero con la misma clasificación: orgánicos, tóxicos y otros; variable si es separación en sitio o en un punto centralizado. El tratamiento de los residuos era la incineración, o en algunos casos iba directo a la disposición final en rellenos sanitarios.

Li et al., (2019) elaboraron un set de recomendaciones que incluye la educación a los habitantes como la prioridad, especialmente al tratarse de separación en sitio y de un país en vías de desarrollo donde el tema de segregación es reciente. Posterior a ello, la propuesta yace en la mejora continua del sistema de gestión para hacerlo resiliente ante los cambios en comportamientos de la población y a agregar incentivos a la segregación correcta.

Lubelskie Voivodship, Polonia

Florkowski *et al.* (2018) examinan la generación de residuos alimenticios para la generación de biogás en la zona rural de Lubelskie Voivodship, zona al este de Polonia. Por medio del método Tobit, se estudian los factores responsables de las variaciones en la generación para identificar a la población con mayor viabilidad a tratar mediante el proceso de digestión anaerobia.

El estudio analiza la edad, ocupación, estudios, estatus, tamaño de vivienda, tamaño de familia, ingresos y distancia a la ubicación de entrega de los residuos. En este caso, el perfil identificado en la investigación con mayor idealidad para la separación de los residuos alimenticios para su

aprovechamiento como energía son mujeres, con un nivel de ingresos alto, con empleo de medio tiempo y nivel de educación alto (Florkowski *et al.*, 2018).

Estudiando los casos anteriores es evidente que una adecuada gestión integral de residuos en localidades rurales brinda beneficios a la salud, al medio ambiente y a la economía de los habitantes; específicamente a poblaciones que usualmente se encuentran viviendo en situación de pobreza y que su remota ubicación dificulta el acceso a servicios básicos. Así como en El Playón se aprovecharon residuos orgánicos para facilitar el trabajo de los agricultores y en Texcoco se redujo la dependencia hacia actores externos de la comunidad mediante la elaboración de un fertilizante, el presente proyecto busca facilitar la implementación del proceso de digestión anaerobia en zonas rurales de México para el tratamiento de residuos orgánicos, y simultáneamente, su aprovechamiento para energía.

### **3. Objetivo**

El objetivo del presente proyecto es elaborar una herramienta que auxilie a los tomadores de decisiones del Sur de México a la correcta selección del proceso de digestión anaerobia como el tratamiento de residuos orgánicos en zonas rurales del Sur de México.

#### **3.1 Específicos**

- Comparar y contrastar las opciones de diseño de un digestor anaerobio para el tratamiento de cinco tipos de biomasa
- Identificar criterios y parámetros de selección para la aplicación de procesos de digestión anaerobia considerando las características particulares de la localidad rural
- Definir la metodología para la evaluación de criterios y parámetros de selección
- Elaborar mapas por medio de un sistema de información geográfica para localizar los diferentes tipos de biomasa en la región de estudio
- Elaborar una matriz de selección de criterios considerando cuatro tipos de digestores para el tratamiento de residuos orgánicos en zonas rurales del Sur de México
- Elaborar una matriz técnica de selección de criterios del proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos en zonas rurales del Sur de México

#### **3.2 Alcances y Limitantes**

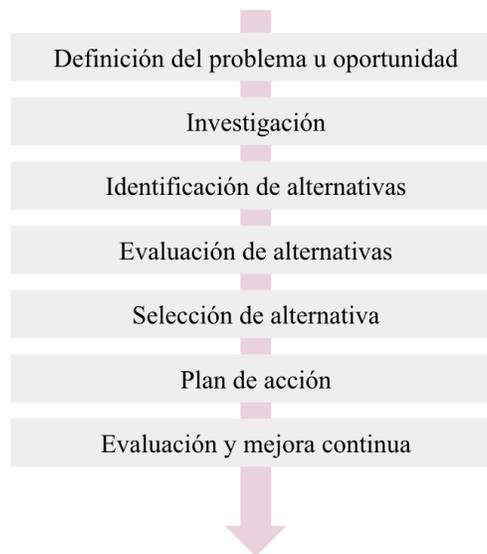
El proyecto considera únicamente una zona económica del país, el Sur de México, y una tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos (proceso de digestión anaerobia), con sus respectivas justificaciones en las siguientes secciones del documento. Esta decisión se realiza debido a la limitante temporal del proyecto.

Otra restricción relevante es la disponibilidad de información para el sistema de información geográfica (SIG). El último Censo Agrícola, Ganadero y Forestal se realizó en el 2007, hace 12 años. INEGI es la entidad responsable del levantamiento de datos, sin embargo sus alcances y objetivos dependen de presupuestos gubernamentales. Por lo tanto, se trabaja con los archivos e información más reciente y de carácter gratuito. Por ello, los mapas generados para estiércol

total, ganado bovino, ganado porcino, aves de corral, ganado ovino y el área de cultivo se elaboran con datos del último censo, del 2007. Así como el mapa de los residuos sólidos municipales utiliza información del Censo de Población y Vivienda del 2010.

#### 4. Metodología

El proceso para la toma de decisiones auxilia a quien tiene diversas alternativas a elegir. Hussung (2017) explica que el proceso se divide en siete etapas, ver Figura 5. Inicialmente se identifica el problema o la oportunidad, posterior a ello se recopila información para poder identificar las alternativas. Luego, se elabora una evaluación de factibilidad, aceptabilidad y deseabilidad de cada una de ella. Una vez que se reconozcan los puntos a favor y en contra de las opciones, será posible la selección. Finalmente, comienza el plan de acción y se evalúa para la mejora continua de la alternativa aplicada.



**Figura 5.** Esquema del proceso de toma de decisión

El objetivo del presente proyecto es diseñar una herramienta para la cuarta etapa del proceso de toma de decisión: la evaluación las alternativas del proceso de digestión anaerobia como tratamiento biológico de residuos orgánicos en zonas rurales del Sur de México. Para ello, se elabora la estructura metodológica del proyecto apoyándose fuertemente en herramientas existentes: los sistemas de información geográfica, diagramas de flujo y las matrices de decisión.

La metodología del proyecto consiste primeramente en la revisión bibliográfica de la tecnología y su análisis; considerando el proceso, productos, aplicaciones, variables de operación, tipos de biomasa y tipos de reactores para el proceso de digestión anaerobia. Del amplio panorama que

ofrece la tecnología, se considera la delimitación geográfica para seleccionar los criterios aplicables a utilizar en todas las herramientas. La metodología del proyecto se resume en la Figura 6.



**Figura 6.** Esquema metodológico del proyecto

#### 4.1 Sistema de Información Geográfica

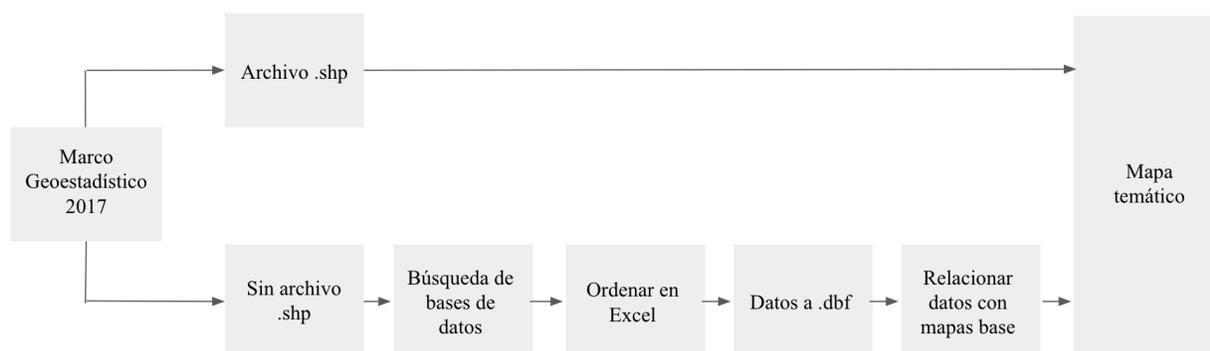
Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un conjunto de herramientas para almacenar, ordenar y procesar datos de manera espacial. Utilizando información geográfica actualizada y completa es posible generar mapas, imágenes, productos digitales y datos de manera rápida, coherente y con capacidad de análisis (INEGI, 2014).

Reconociendo estas ventajas, se utilizó un SIG para evaluar la localización y condición de las diferentes tipos de biomásas evaluadas en el contexto estudiado. La herramienta seleccionada es el Mapa Digital para Escritorio Versión 6.3, desarrollado por INEGI. Las bases de datos utilizadas provienen de diversas fuentes y se buscaron sean las más actualizadas y disponibles. La Tabla 2 sintetiza las fuentes utilizadas.

**Tabla 2.** Datos analizados según el tipo de biomasa en el sistema de información geográfica.

| Tipo de biomasa              | Datos analizados  | Fuente  |
|------------------------------|---|---|
| Residuos sólidos municipales | Población en localidades rurales                          | Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2010)       |
| Estiércol                    | Unidades de producción de ganado bovino por municipalidad | Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (INEGI, 2007) |
| Cosechas                     | Hectáreas cultivadas por municipalidad                    | Censo Agrícola, Ganadero y Forestal (INEGI, 2007) |
| Residuos de cosechas         |   |   |

El procedimiento para la elaboración de los mapas se muestra en la Figura 7. Comienza con la búsqueda de archivos base del Marco Geoestadístico 2017 para ubicar las delimitaciones estatales de México y municipales de Chiapas, Guerrero y Oaxaca. La Figura 8. muestra los resultados de dichos archivos en el programa.



**Figura 7.** Esquema metodológico del sistema de información geográfica

Al obtener el mapa base, el siguiente paso consistió en la búsqueda de los datos por tipo de biomasa, comenzando con los residuos sólidos municipales. Considerando una misma cantidad de generación per cápita, un sitio con mayor población lidiará con una mayor cantidad de residuos sólidos que un sitio con menor población. Por lo tanto, se busca representar la ubicación y tamaño de las poblaciones de localidades rurales en los Estados del Sur. Para ello, se ubica el archivo preparado por INEGI en formato .shp del Censo de Población y Vivienda del 2010.



**Figura 8.** Mapa base: delimitaciones estatales y municipales de México.

Una vez que se ingresa la capa de información al programa, se elabora un mapa temático en el cual se colorean las localidades según su cantidad de población. Para el caso de las localidades rurales, se realizan estratificaciones por cada 500 habitantes. Considerando que el límite de una población para ser definida como rural es 2,500, se generan cinco grupos.

Posterior a la elaboración de los residuos sólidos municipales, se procesó la información de estiércol. Los datos analizados incluyen un mapa con la suma de la población del ganado bovino, porcino, ovino y aves de corral, así como mapas individuales para cada tipo de ganado. En este caso, los datos no se encuentran disponibles en formato .shp y se trabaja una base de datos en Excel (Figura 9.) con información proveniente del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007. Posteriormente se importó la información al programa en formato .dbf para finalmente relacionar el mapa con los datos por medio de la clave de municipio (CVEGEO).

La estratificación de los datos para los mapas temáticos de estiércol, variaron según los datos.

En el caso del estiércol total se crearon seis grupos, comenzando de 0 a 200,000 animales, posterior de 200,000 a 400,000 y así sucesivamente hasta el último eran municipios con más de 1,000,000 de unidades de ganado.

Para el estiércol bovino se dividieron cinco grupos que comienza de 0 a 20,000 cabezas, siguiente 20,000 a 40,000 cabezas, así hasta llegar al último grupo representando a los municipios con más de 80,000 cabezas.

El mapa con datos del ganado porcino se trabajó con cinco grupos. El primero representando a aquellos municipios con 0 a 4,000 cerdos, el segundo de 4,000 a 8,000 y así sucesivamente hasta el último grupo que representa una población mayor a 16,000.

Los datos de las aves de corral también se dividieron en cinco grupos. Estos varían de 50,000 en 50,000 y el último muestra a los municipios con poblaciones mayores a 200,000.

Para concluir los datos de estiércol, se aclara que la división de grupos en los datos de estiércol ovino fue en seis. El primero demostrando valores de población entre 0 y 1,500, el siguiente entre 1,500 y 3,000, así sucesivamente hasta el último grupo que representa aquellos municipios con poblaciones mayores a 8,500.

| CVEGEC | NOMBRE                    | UNID PRODU | MENOS 1 AN | 1 A 2 ANOS | 2 A 3 ANOS | MAYOR 3 |
|--------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| 07001  | Acacoyagua                | 329        | 174        | 119        | 85         | 155     |
| 07002  | Acala                     | 584        | 340        | 166        | 116        | 231     |
| 07003  | Acapetahua                | 838        | 521        | 349        | 341        | 410     |
| 07004  | Altamirano                | 886        | 294        | 177        | 172        | 139     |
| 07005  | Amatán                    | 998        | 472        | 220        | 193        | 387     |
| 07006  | Amatenango de la Frontera | 133        | 55         | 42         | 43         | 44      |
| 07007  | Amatenango del Valle      | 84         | 16         | 5          | 4          | 7       |
| 07008  | Angel Albino Corzo        | 291        | 202        | 133        | 117        | 149     |
| 07009  | Arriaga                   | 1193       | 950        | 425        | 550        | 675     |
| 07010  | Bejujal de Ocampo         | 96         | 10         | 3          | 3          | 2       |
| 07011  | Bella Vista               | 318        | 95         | 35         | 31         | 44      |

Figura 9. Ejemplo de base de datos

Finalmente, la elaboración del mapa de cosechas y sus residuos se trabajó con la cantidad de hectáreas cosechadas por municipio según el Censo Agrícola, Ganadero y Forestal del 2007. Los datos al no encontrarse en formato .shp se vaciaron a un Excel para posteriormente importar al

programa en formato .dbf. Una vez que se relaciona la información a los mapas base, se elabora el mapa temático.

## **4.2 Matriz de Selección**

Existen diversos métodos para evaluar la toma de decisiones, tales como el diagrama de fortalezas, oportunidades, debilidades y análisis (FODA), el análisis Pareto, QUALIFLEX, las matrices de decisión, ELECTRE, por mencionar algunos. Cada uno de ellos tendrá sus ventajas y desventajas, y su selección variará del objetivo, la disponibilidad de la herramienta, velocidad del trabajo y los datos (Tobón, 2013). Al tratarse de un análisis de decisión con múltiples criterios que busca ser de fácil comprensión para los tomadores de decisiones, se seleccionan las matrices como el método a desarrollar. Se identificó que su posibilidad de dividir una decisión compleja en secciones, analizar cada parte e integrarlas para una mejor comprensión panorámica de la alternativa de selección (Natural Resources Leadership Institute, 2008) se alinean a los objetivos del presente proyecto.

De acuerdo con Canter (2000), existen diversos enfoques para diseñar una matriz de decisión. Sus diferencias yacen generalmente en la presentación y evaluación de la información. Las matrices podrán contar con un sistema cualitativo, cuantitativo, de jerarquización, de ponderación, o bien, una combinación de ellos. Para la elaboración de la herramienta para la selección para la correcta selección del proceso de digestión anaerobia se trabaja con una matriz cualitativa y cuantitativa.

## 5. Desarrollo

### 5.1 Digestión Anaerobia

El proceso de digestión anaerobia es una tecnología que ha sido impulsada según el comportamiento del precio del petróleo. En algún punto de la segunda guerra mundial, en India durante los sesentas y en China durante los setentas, el biogás tomó fuerza para ser utilizado como combustible. Aunque su mayor auge sucedió en los ochentas cuando la biodigestión fue aplicada con fines medioambientales para el tratamiento de lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Varnero, 2011).

La intención de desarrollar proyectos con tecnología de digestión anaerobia ha variado entre países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo. Para los países en vías de desarrollo, el uso del proceso de digestión anaerobia es motivada por intereses medioambientales, mientras que, en las regiones con menor desarrollo lo han impulsado por cuestiones energéticas (Varnero, 2011). Aunque, independientemente de los motivos detrás del uso de esta tecnología, lo consistente en ambas realidades es que tiene el potencial de mejorar las condiciones sanitarias, ambientales, generar energía renovable y obtener un digestato o producto final que funciona como fertilizante (Varnero, 2011). Dicha tecnología se vuelve de interés para el tratamiento de residuos orgánicos en zonas rurales y el aprovechamiento de este mismo proceso para la generación de calor o electricidad .

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno. Su invención fue inicialmente para tratar estiércol vacuno y lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales, pero con el tiempo, su aplicación se ha ampliado a residuos alimenticios y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Begum, 2014).

La elección del proceso de digestión anaerobia sobre procesos aerobios es principalmente por la ventaja de producción de biogás y su aprovechamiento como fuente renovable de energía (Tchobanoglous *et al.*, 1997). La posibilidad de conversión del biogás a electricidad por medio de un sistema combinado o incluso su refinación para la sustitución del gas natural es una opción

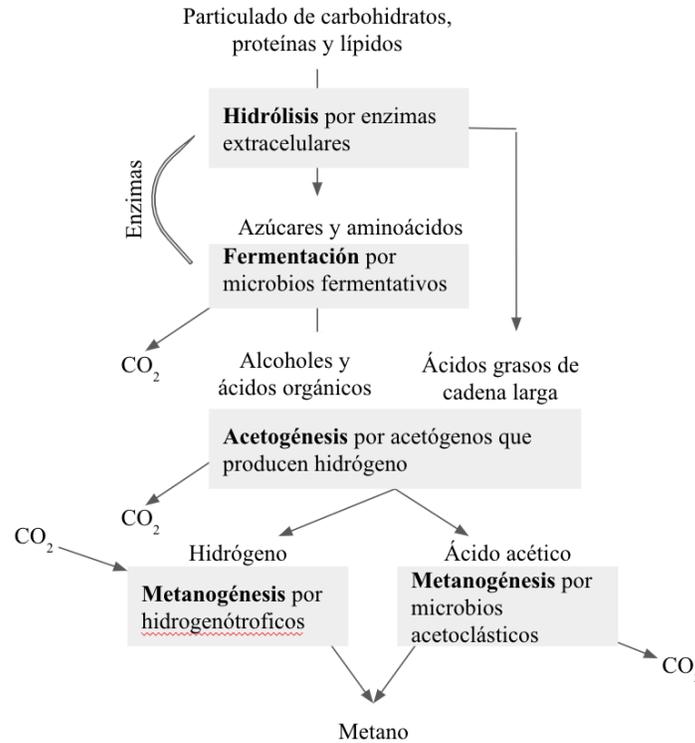
prometedora ante la escasez energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Begum, 2014). Otras ventajas presentes en este proceso incluye el hecho de que no requiere oxígeno, no es energéticamente intensivo y el ya mencionado biogás es generado de manera constante (Frear, 2013).

Al finalizar las fases del proceso de digestión anaerobia, el producto final o digestato tendrá un contenido de sólidos totales menor a lo que apenas entrará al digestor. Su uso o disposición variará según el tipo de sólido orgánico que se haya utilizado en el proceso. En caso de ser biosólidos, el digestato podrá ser aprovechado como fertilizante. En caso de que esta opción no sea viable, se recurre a la incineración, disposición en relleno sanitario, compostaje o tratamiento posterior para remover sólidos y extraer nutrientes (Christensen, 2010).

#### 5.1.1 Proceso

La digestión anaerobia puede ser dividido en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Caruana & Olsen, 2011). Durante cada fase, actúan diferentes grupos de microorganismos y por ello se conoce la digestión anaerobia como un proceso estructurado (Christensen, 2010). Contiene el riesgo de que si en una fase no se cumple su función, desencadene fallas en las siguientes fases y limite la producción de biogás (Frear, 2013).

Todas las moléculas de los sólidos orgánicos entrando en un digestor, como ejemplo los carbohidratos, proteínas y lípidos, son demasiado grandes y deben ser convertidas a moléculas solubles y metabolizables por medio de enzimas. Las enzimas utilizadas en la hidrólisis provendrán de la fermentación, una fase posterior. Una vez que las moléculas de mayor tamaño sean convertidas en azúcares, y aminoácidos, las bacterias fermentativas proseguirán a hacerlos alcoholes y ácidos orgánicos. Estos últimos en conjunto con los ácidos grasos, producto de la hidrólisis, serán utilizados en la acetogénesis y pasarán a ser hidrógeno y ácido acético. Finalmente, arqueas metanogénicas serán las últimas en contribuir al sistema y producen el biogás (Caruana & Olsen, 2011). Todo este proceso se puede observar en la Figura 10.



**Figura 10.** Esquema del proceso de digestión anaerobia.  
(Adaptada de Christensen, 2010)

## Hidrólisis

La hidrólisis forma parte del primer paso en el proceso de digestión anaerobia. Durante esta fase, polímeros complejos son convertidos en monómeros que pueden ser utilizados durante la acidogénesis. Las partículas antes de la hidrólisis pueden ser carbohidratos, proteínas o lípidos, aunque los últimos dos son reducidos mayormente que el primero, lo que podría significar mayor generación de biogás. Sin embargo, al mismo tiempo producen amoníaco y ácidos grasos de cadenas largas los cuales inhiben la procesos de la metanogénesis, etapa posterior del proceso de digestión anaerobia de la que depende la producción de biogás. Posterior a este proceso extracelular, los productos son ácidos grasos, aminoácidos y azúcares simples (Christensen, 2010).

## Acidogénesis

La acidogénesis o fermentación es la segunda etapa del proceso de digestión anaerobia. Dicha etapa está compuesta por bacterias formadoras de ácido, o bien, bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas (Varnero, 2011). Su importancia radica en que proveen el producto de los

organismos de etapas posteriores: ácido grasos volátiles (Christensen, 2010). Además, durante la acidogénesis se eliminan restos de oxígeno en el sistema (Varnero, 2011).

### Acetogénesis

Los productos de la fermentación que no puedan ser procesados directamente en la metanogénesis, pasarán por la acetogénesis. Durante esta tercera etapa, los ácidos grasos volátiles son transformados a productos más sencillos como el acetato e hidrógeno para el uso posterior en la metanogénesis.

### Metanogénesis

La metanogénesis es la etapa final y cuando la producción del biogás sucede. Todos los pasos anteriores preparan la biomasa para convertirla a un producto que los metanógenos puedan digerir (Varnero, 2011). Los metanógenos que consumen hidrógeno y dióxido de carbono se conocen como hidrogenotróficos y los que consumen acetato, metanol y algunas aminas son los acetoclásticos. Ambos producen metano ( $\text{CH}_4$ ) como producto final.

### 5.1.2 Productos

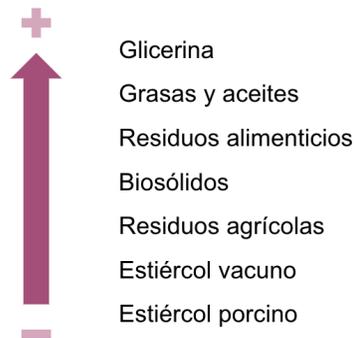
#### Digestato

El digestato es un producto del proceso y puede mostrarse en estado sólido o líquido, según el tipo de digestor. Al tratarse de un digestor de dos etapas, el digestato sólido provendrá del primer contenedor donde sucede la hidrólisis, acetogénesis y acidogénesis, mientras que el líquido se originará en el segundo contenedor de la metanogénesis (Christensen, 2010). Usos del digestato sólido puede ser el compostaje, producción de fiberboard o fertilizante. Sólo con la recomendación de verificar el contenido del digestato para evitar la toxicidad y generar efectos negativos en lugar de positivos. Por otro lado, el digestato líquido puede sustituir el uso de agua potable en el sistema al reincorporarse para diluir la biomasa. Sin embargo, en algún punto será un tipo de líquido residual y podrá tener procesos adicionales para evitar la contaminación (Christensen, 2010).

## Biogás

El biogás está compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano. El rendimiento de la producción de estos gases varía según el contenido energético de los residuos orgánicos utilizados (Caruana & Olsen, 2011). La Figura 11 muestra los materiales ordenados según su contenido energético.

La proporción promedio de producción de metano y dióxido de carbono se encuentra en 55%-65% y 35%-45%, respectivamente. El biogás también contiene el amoníaco, ácido sulfhídrico y algunos compuestos orgánicos volátiles, sin embargo, en sólo 1% o menos (Christensen, 2010).



**Figura 11.** Contenido energético de residuos orgánicos.  
(Adaptada de Begum, 2014)

Un digestor anaerobio generalmente proporciona mayor energía a la que requiere para su función (Christensen, 2010). Lo que significa que el metano podrá ser utilizado como fuente de energía, aprovechándose por medio del calor y/o electricidad. Incluso, si el biogás recibe un tratamiento completo de remoción de  $H_2S$  y compresión, puede reemplazar el gas natural. La energía proveniente es neutra en carbono debido a que el dióxido de carbono fotosintetizado de residuos orgánicos es convertido a metano y dióxido de carbono (Caruana & Olsen, 2011). El dióxido de carbono regresará a la atmósfera cuando el biogás sea aprovechado para electricidad o calor (Caruana & Olsen, 2011).

Aún cuando el biogás es considerado neutro en carbono, debe existir la correcta precaución para evitar escapes de gas metano. Debido a que este gas tiene veinticinco veces mayor potencial de calentamiento global que el dióxido de carbono (Christensen, 2010) y llega a ser un riesgo en un sistema que busca reducir impactos ambientales.

## Aplicaciones

Las aplicaciones del biogás son tres: para aprovechamiento de calor; generación de electricidad o electricidad y calor; y combustible de vehículos, en orden de complejidad. Utilizar el biogás para actividades básicas de la vivienda como cocinar o calentar agua es la manera más simple de aprovechar el producto de la digestión anaerobia. Incluso, los calentadores no requieren de una calidad de biogás alta. Los niveles de ácido sulfhídrico pueden mantenerse debajo de las 1,000 ppm (Varnero, 2011).

Utilizar el biogás para un proceso combinado es la manera más eficiente de aprovecharlo. Generalmente se requiere de un motor de combustión interna y el sistema puede tener como objetivo principal la generación de electricidad y el calor como producto secundario, o viceversa. La calidad del biogás es mayor; máximo 100 ppm de ácido sulfhídrico (Varnero, 2011).

Finalmente, la última aplicación presenta los mayores retos. La posibilidad de utilizar biogás en vehículos se asimila a los vehículos que operan con gas natural. De hecho, requiere de la misma infraestructura. Aquí el biogás deberá tener la calidad del gas natural y deberá ser purificado para poder comprimirlo en tanques. Esta aplicación es limitada debida a la infraestructura existente. Los vehículos adaptados a funcionar con gas natural son pocos, además de la ausencia de espacios para el abastecimiento (Varnero, 2011). Aún con estas limitaciones, la tecnología tiene gran potencial de aplicabilidad en el transporte, que tiene como objetivo generar bajas emisiones de efecto invernadero.

### 5.1.3 Variables de Operación

Para una operación adecuada de un digestor anaerobio, hay múltiples parámetros que deberán ser considerados en su diseño y operación. La temperatura, el pH, el tiempo de retención hidráulica, la presencia de sustancias tóxicas y la disponibilidad de nutrientes afectará

directamente la producción de biogás en el proceso de digestión anaerobia (Begum, 2014). Estos parámetros y sus rangos óptimos se discuten a continuación.

### Temperatura

Así como los humanos tenemos rangos climáticos de confort, los microorganismos anaerobios también requieren de ambientes específicos para su correcto funcionamiento. La digestión anaerobia puede suceder en temperaturas psicrófilas, mesofílicas o termofílicas, 10°C - 25°C, 30°C - 40°C o 50°C - 60°C, respectivamente (Caruana & Olsen, 2011). Su elección dependerá del diseño del digestor; la energía que se disponga a inyectar y el tiempo de retención hidráulica.

Como cualquier otro proceso biológico, un aumento en temperatura significa un aumento en la velocidad de reacción, lo que se traduce a un crecimiento más rápido de las bacterias anaerobias. Las bacterias termofílicas pueden reducir el tiempo de retención hidráulica pero necesitarán de un sistema que mantenga el digestor en temperaturas altas. Estas bacterias proveen una mayor degradación y uso de biomasa, y destruyen patógenos efectivamente. Aunque al tratarse de temperaturas más altas y que difícilmente se presentan naturalmente en el clima, la inyección de energía para mantener funcionando estos sistemas corren el riesgo a consumir más energía de la que producen (Frear, 2013). Así como también pueden ser sistemas más inestables, con mayor sensibilidad al shock térmico y con mayor generación de olores (Begum, 2014).

Manejar sistemas de digestión anaerobia a temperaturas mesofílicas es más común debido a su mayor estabilidad y control y su menor necesidad de inyectar energía para mantener una temperatura adecuada (Frear, 2013).

### Tiempo de Retención Hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es la cantidad de tiempo que un volumen determinado de sustrato permanece en el digestor (Chen & Niebling, 2014). Su cálculo es una división del volumen total del digestor entre el afluente diario dando un resultado en días, se observa en la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de Retención Hidráulica (d)} = \frac{\text{Volumen de digestor (m}^3\text{)}}{\text{Afluente diario } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}$$

El tiempo de retención hidráulica es uno de los parámetros más relevantes en el diseño de un digestor y deberá ser monitoreado para su correcto funcionamiento. Si la biomasa no se procesa por el TRH diseñado, la digestión fracasará. Dependiendo del tipo de digestor y la biomasa que se esté tratando, el TRH variará de 2 o 3 días hasta 60 días (Begum, 2014). Los digestores de flujo ascendente son los que tendrán tiempos más cortos, mientras que las lagunas anaerobias cubiertas tendrán los períodos más largos.

### Alcalinidad y pH

Además de la temperatura, el pH es un parámetro de gran importancia en el proceso de digestión anaerobia. La alcalinidad juega una parte esencial en el proceso ya que controla el pH, nivelando la acidez creada en la acidogénesis. Generalmente la alcalinidad es proporcional a la concentración de sólidos del afluente y su valor varía entre 2,000 mg/L a 5,000 mg/L (Begum, 2014).

Microorganismos metanogénicos y acidogénicos tienen diferentes niveles de pH óptimo. Los primeros reportan un funcionamiento ideal entre 7 y 8, mientras los segundos tienen valores más bajos. En un proceso mesofílico, el pH oscila entre 6.5 y 8, un cambio fuera del rango probablemente generará que todo el sistema falle (Begum, 2014).

### Sustancias Tóxicas

La toxicidad implica la reacción de un sistema ante una dosis (Hamilton, 2017). Una sustancia tóxica puede afectar el proceso de digestión anaerobia de manera mínima o incluso llevar a una falla completa. Las sustancias tóxicas más comunes en digestores incluye la amonía, sulfuro, metales pesados e iones metálicos, por mencionar algunos (Begum, 2014). Aunque no necesariamente su existencia implique complicaciones. Por ejemplo, en el caso del amoníaco, pequeñas cantidades pueden fungir como nutriente en forma de nitrógeno para los microorganismos, aunque dosis mayores afectará la producción del biogás (Hamilton, 2017).

Otras sustancias que inhiben los procesos de la digestión anaerobia incluye la presencia de oxígeno y luz, desinfectantes como herbicidas, metales pesados o antibióticos, especialmente al tratar con estiércol aviar, también la presencia de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) o altas concentraciones de amoníaco (Begum, 2014).

Una manera para medir la toxicidad de una sustancia en un sistema de digestión anaerobia es llevando a cabo un *Anaerobic Toxicity Assay (ATA)*. La prueba podrá seguir los métodos de la ISO 13641-1 : 2003 o la ISO 13641-2 : 2003 y dará como resultado un porcentaje de inhibición (Begum, 2014). A partir de ese valor se entenderá si la sustancia es inhibidora, tóxica o estimulando; facilitando la toma de decisiones en cuanto al diseño del sistema (Hamilton, 2017). Cabe mencionar que un ATA es un método eficiente, pero costoso (Frear, 2013).

#### Tasa de Carga Orgánica

La cantidad de materia seca orgánica que ingrese al digestor por unidad de volumen de su capacidad por día se le conoce como la tasa de carga orgánica. Esta tasa es un factor de operación importante ya que si es muy alto puede generar biogás en exceso, que si no cuenta con infraestructura para su manejo se desperdiciara. De manera contraria, una baja tasa de carga orgánica tendrá una menor producción de biogás. (Begum, 2014)

## Nutrientes Disponibles

El carbono, nitrógeno, fósforo y sulfuro son indispensables en la supervivencia de los microorganismos en el proceso de digestión anaerobia. Aunque microelementos como hierro, cobalto, selenio, molibdeno, níquel y tungsteno también son esenciales para el proceso. Una cantidad insuficiente de ellos podrá generar un efecto inhibitor en el sistema y causar inestabilidad. La idealidad entre ellos es la siguiente: relación carbono-nitrógeno (C:N) aproxima entre 20:1 y 30:1, la relación carbono, nitrógeno, fósforo y sulfuro (C:N:P:S) es considerada 600:15:5:1. Adicionalmente, para mantener la actividad metanogénica debe mantenerse entre 50, 10 y 5 mg/l de nitrógeno, fósforo y sulfuro en fase líquida, respectivamente (Begum, 2014).

### 5.1.4 Tipos de Biomasa

La biomasa a utilizar en el proceso de digestión anaerobia es variada. Existe la posibilidad de utilizar un solo tipo de residuos, o bien, una mezcla de ellos y a esto se le conoce como codigestión. De acuerdo con Stucki (2011), los residuos orgánicos suelen ser clasificados de manera general en seis tipos: cosechas, residuos de cosechas, estiércol, forestales, fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y lodos residuales. Dentro de cada tipo existen subclasificaciones, aunque por sus similitudes químicas seguirán perteneciendo al mismo grupo.

#### Cosechas

Las cosechas o cultivos energéticos son plantas con alto potencial de producción de biogás y otras energías alternativas. Algunas cosechas en esta categoría son: maíz, mijo, sauce y caña de azúcar (Begum, 2014). Las características que comparten estos cultivos son los bajos costos y los altos rendimientos energéticos.

#### Residuos de cosechas

Los residuos de cosechas se refiere al follaje, rastrojos, o cualquier otro material vegetal residuos de cultivos que puedan ser aprovechados para energía (FAO, 2014).

## Estiércol

El estiércol de origen animal puede ser bovino, porcino, caprino, equino, ovino, de conejos, aves, patos o pavos (Varnero, 2011). Su uso en la producción de biogás es popular especialmente en la industria (Begum, 2014). Su potencial de producción de biogás se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Producción de biogás por tipo de estiércol en México (Adaptación de Ríos & Kaltschmitt, 2016).

| <b>Tipo de Estiércol</b> | <b>Peso del animal (kg)</b> | <b>Estiércol producido (ton/año)</b> | <b>Materia seca (%)</b> | <b>Materia orgánica en porcentaje a la materia seca</b> | <b>Producción de biogás (m<sup>3</sup>/ton)</b> |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|---|
| Vacuno                   | 450                         | 11 - 13                              | 0.10 - 0.15             | 0.7 - 0.8   | 200 - 350                                       |
|                          | 100                         | 2.4 - 6.9                            |                         | 0.7 - 0.8   | 200 - 350                                       |
| Porcino                  | 100                         | 2.2 - 3.0                            | 0.05 - 0.10             | 0.7 - 0.8   | 350 - 550                                       |
|                          | 20                          | 0.4 - 0.6                            |                         | 0.7 - 0.8   | 350 - 550                                       |
| Pollo                    | 2.0                         | 0.04 - 0.07                          | 0.10 - 0.20             | 0.7 - 0.8   | 350 - 550                                       |
|                          | 0.3                         | 0.005 - 0.01                         |                         | 0.7 - 0.8   | 350 - 550                                       |

## Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales

La fracción orgánica de los residuos sólidos municipales consiste principalmente en residuos de vegetales y frutas, desperdicios alimenticios, café, filtros de café entre otros residuos orgánicos (Begum, 2014).

## Forestales

Los residuos forestales incluye hojas, vástagos, ramas y cortezas (Varnero, 2011).

## Lodos Residuales

Casi la totalidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales producen lodos residuales. Esta biomasa es factible para utilizar en un proceso de digestión anaerobia. Aunque la

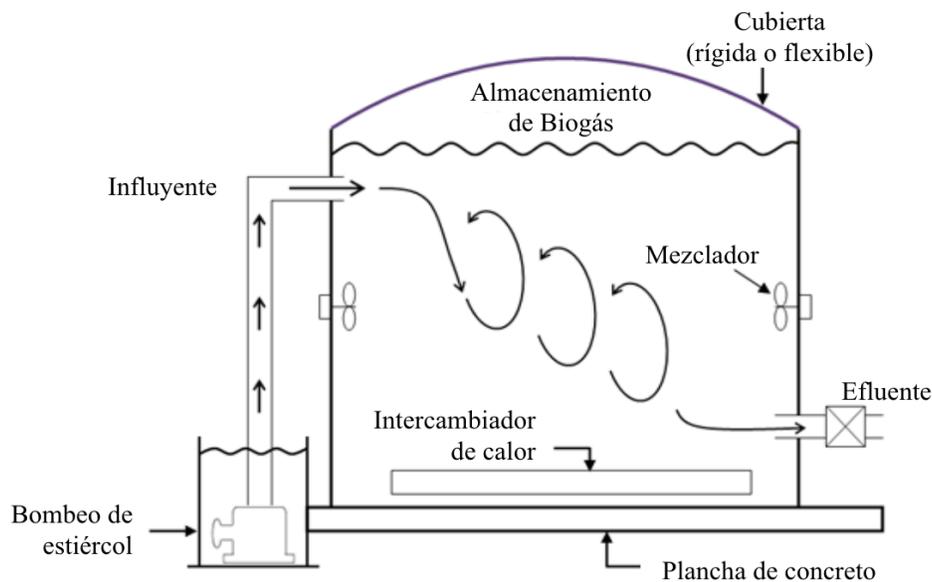
producción de biogás mediante esta biomasa es limitada, por lo que se considera un sustrato de baja calidad (Begum, 2014).

### 5.1.5 Tipos de Digestores

Frear (2011) identifica que existen infinidad de variaciones en el diseño de digestores anaerobios, sin embargo, algunas características persisten llevándolo a clasificarlos en cinco categorías: mezcla completa, flujo pistón, lecho empacado, laguna cubierta y reactor anaerobio de flujo ascendente.

#### Mezcla Completa

Un digestor de mezcla completa es típicamente elaborado con acero de una estructura cilíndrica vertical sobre el suelo o debajo de él, en cualquier modo. Este diseño es popular en Europa y en plantas de tratamiento de aguas residuales americanas debido a su facilidad de construcción, mezclado, y la producción de un ambiente constante lo cual conlleva una producción de biogás poco variable (Frear, 2013). Además, de que el diseño es flexible para utilizar cubiertas flexibles o fijas. Un diagrama del sistema se visualiza en la Figura 12.



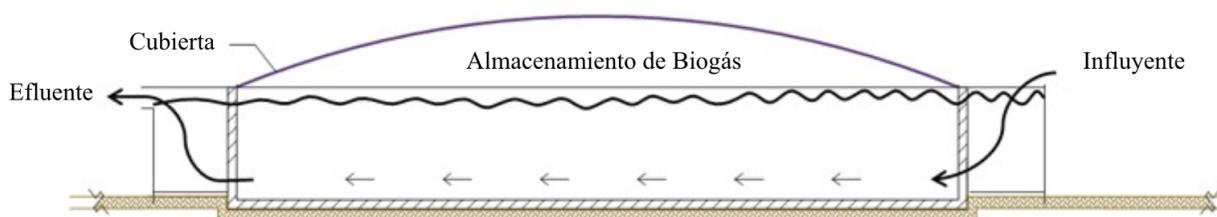
**Figura 12.** Estructura de digestor de mezcla completa.  
Adaptada de EPA (2019)

Las temperaturas comunes en este diseño son usualmente mesofílicas y termofílicas. El tiempo de retención hidráulica varía entre 10 a 25 días y su funcionamiento es idealmente con biomasa con sólidos en un 3% a 10% (Chen & Niebling, 2014). Otra ventaja de los digestores de mezcla completa es que son factibles a utilizar en procesos de codigestión (Begum, 2014). Sin embargo, si una sustancia inhibidora al proceso ingresa al reactor, afectará a todo el sistema, deteniendo la biomasa que se encontraba en tratamiento por días (Frear, 2013).

### Flujo Pistón

El digestor flujo pistón funciona en un esquema primera entrada - primera salida donde un contenedor horizontal, largo y estrecho empuja el afluente por un lado y el efluente del otro (Frear, 2013), ver Figura 13. Este diseño es construido comúnmente debajo del nivel del suelo y calentado por medio de agua caliente. Funciona con biomasa con contenido de sólidos entre 11% y 13% y su tiempo de retención hidráulica varía entre 15 a 30 días, pero sin bajar de 15 (Chen & Niebling, 2014). Un digestor flujo pistón no es apto para codigestión (Begum, 2014).

Este tipo de digestor tiene la ventaja de ser bajo en nivel tecnológico; implicando menores costos, riesgos y complicaciones en la operación. Además de que funciona bien con estiércol vacuno, debido a que hay un mayor control del tiempo de retención hidráulica, en comparación con otros diseños (Frear, 2013).

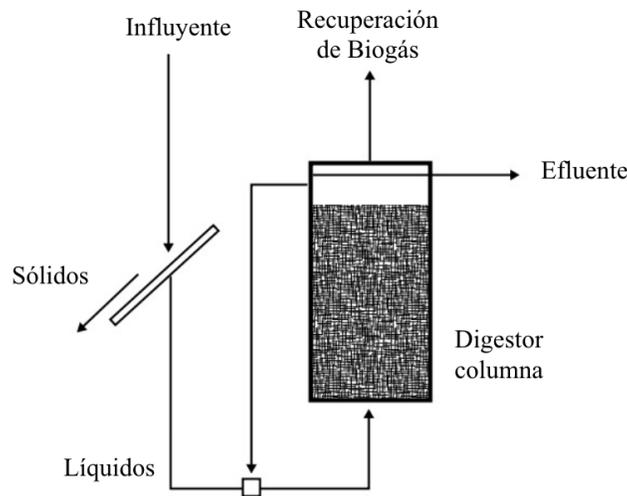


**Figura 13.** Diagrama de funcionamiento de digestor tipo flujo pistón.  
Adaptada de EPA (2019)

## Lecho Empacado

Un reactor de lecho empacado es básicamente una columna llena de contenido plástico o astillas de madera, las cuales las bacterias lo emplean como soporte y existen en una cantidad diez veces mayor a otros reactores (Chen & Niebling, 2014), observar Figura 11. El afluente fluye entre el medio y entra en contacto con las bacterias que viven en él. El contenido de sólidos ideal se encuentra entre el 1% y el 5%, y su tiempo de retención hidráulica podrá ser de 5 días, o inclusive menos (Begum, 2014). Adicionalmente, este sistema permite la codigestión.

El hecho de que un digester de lecho empacado pueda contener mayor cantidad de bacterias permite reducir su tamaño, eficientizando espacio. Sin embargo, no retira el hecho de que es un tipo de digester costoso y que puede generar problemas si el afluente contiene sólidos que puedan atorarse en el medio (Frear, 2013).

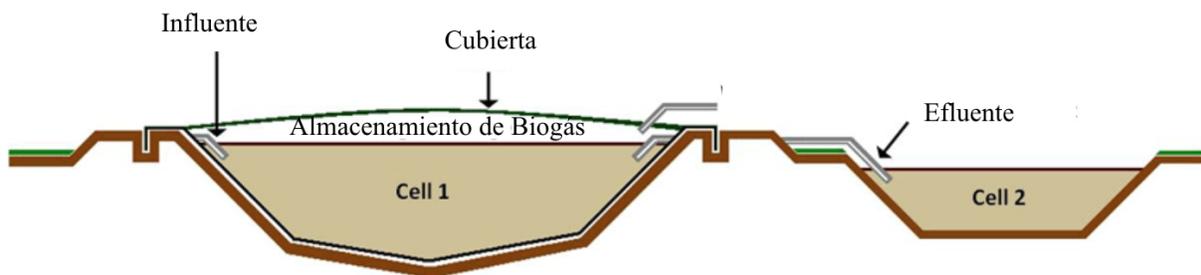


**Figura 14.** Diagrama de digester tipo lecho empacado.  
Adaptada de Chen & Niebling (2014)

## Laguna anaerobia cubierta

Un digester de laguna anaerobia cubierta es un cuerpo de agua con una cubierta flexible o flotante (Chen & Niebling, 2014), ver Figura 15. Este diseño funciona con biomasa baja en concentración de sólidos (entre 0.1% a 2%) y en climas cálidos, debido a que no cuenta con sistemas de calentamiento.

Al no requerir de energía para el mezclado o calefacción, este diseño cuenta con costos de operación bajos (Frear, 2013). Además de ser ideal para sitios con grandes volúmenes de biomasa. Las restricciones de un digestor de laguna cubierta yace en el tiempo de retención hidráulica que tiene un estimado de 40 a 60 días (Begum), el doble o triple en comparación con otros diseños. Así mismo, el tamaño de los sólidos en el afluente debe ser muy fino (Frear, 2013).

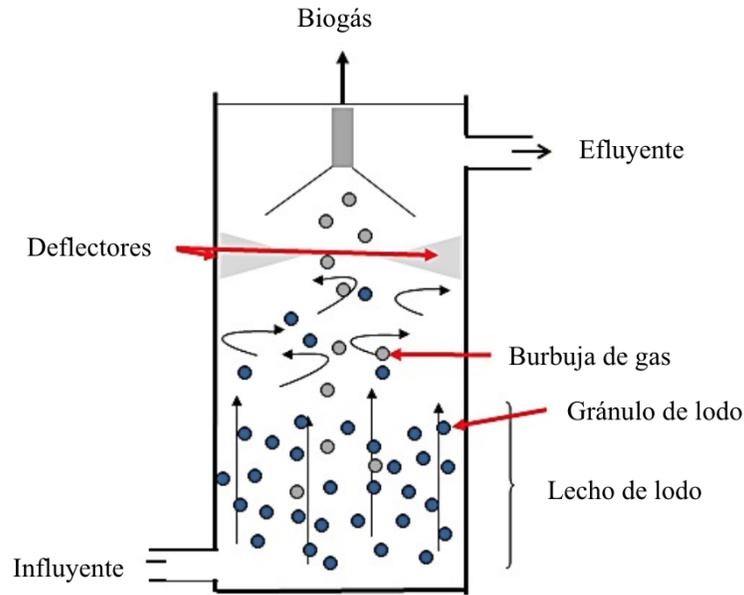


**Figura 15.** Diagrama de una laguna anaerobia cubierta.  
Adaptada de EPA (2019)

#### Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Los digestores anaerobios de flujo ascendente son contenedores verticales con calefacción que continuamente están agregando contenido pero desde la parte inferior del tanque (Frear, 2013), como se observa en la Figura 16. El diseño permite un sistema en el que las bacterias puedan agruparse entre ellas tratando de manera homogénea biomazas con contenido sólido menor a 3%. El tiempo de retención hidráulica en un sistema de este tipo podrá ser de 5 días o inclusive menos. Además, de contar con la posibilidad de codigestión (Begum, 2014).

La rapidez del proceso es una ventaja importante de este diseño, sin embargo, es importante que el afluente tenga consistencia, Frear (2013) lo considera ideal para aguas residuales industriales. Un reactor de flujo ascendente es más costoso que otros diseños, aunque cumple funciones de manera similar al lecho empacado, pero sin insertar objetos artificiales al sistema.



**Figura 16.** Diagrama de reactor anaerobio de flujo ascendente.  
Adaptada de Gomes *et al.* (2016)

Cada digester funcionará de manera ideal en diferentes circunstancias, según el tipo de biomasa y cada una de las variables de operación mencionada en la sección 5.1.3.4. La síntesis de los parámetros de funcionamiento en los diferentes tipos de digestores se observan en la Tabla 4.

Todos los diseños pueden ser utilizados en temperaturas mesofílicas o termofílicas, a excepción de la laguna anaerobia cubierta. Esta última, por su naturaleza, será la única con temperatura psicrófilas. Que su funcionamiento sea en temperatura más bajas directamente impactará en la velocidad de la reacción, por ende, afectará en el tiempo de retención hidráulica. Que al observarse, se vuelve evidente que la laguna tiene tiempos aproximados entre 40 y 60 días de retención hidráulica, el lapso más largo de los cinco tipos presentados.

**Tabla 4.** Comparación de parámetros entre tipos de digestores.

| <b>Tipo</b>                           | <b>TRH (días)</b> | <b>Porcentaje de Sólidos (%)</b> | <b>Codigestión</b> | <b>Temperaturas</b>         |
|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Mezcla Completa                       | 15 +              | 3% - 10%                         | Sí                 | Mesofílicas<br>Termofílicas |
| Flujo Pistón                          | 15 +              | 11% - 13%                        | No                 | Mesofílicas<br>Termofílicas |
| Lecho Empacado                        | ≤ 5               | 1% - 5%                          | Sí                 | Mesofílicas<br>Termofílicas |
| Laguna Anaerobia Cubierta             | 40 - 60           | 0.5% - 3%                        | No                 | Psicrófilas                 |
| Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | ≤ 5               | < 3%                             | Sí                 | Mesofílicas<br>Termofílicas |

Los digestores de lecho empacado y los reactores anaerobios de flujo ascendente son los que presentan menor tiempo de retención hidráulica, igual o menor a 5 días aproximadamente. Sin embargo, Frear (2013) expone que ambos son de los más costosos en la inversión inicial. Además de que también tienen sus limitaciones. Por otra parte, la codigestión es posible en todos los tipos de digestor a excepción del flujo pistón y la laguna anaerobia cubierta.

En síntesis, las ventajas y desventajas de cada tipo de biodigestor se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Ventajas y desventajas por tipo de digestor.

| <b>Tipo</b>                           | <b>Ventajas</b>  | <b>Desventajas</b>   |
|---------------------------------------|--|--|
| Mezcla Completa                       | Ambiente constante<br>Fácil de mezclar<br>Construcción y diseño sencillo<br>Permite partículas sólidas burdas      | Carencia en exactitud de TRH<br>Mayor riesgo ante sustancia inhibidora   |
| Flujo Pistón                          | Control de TRH<br>Poco riesgo ante sustancia inhibidora<br>Bajo nivel tecnológico                                  | Difícil control en el mezclado<br>No ideal para biomasas con menos de 10% de porcentaje de sólidos.                |
| Lecho Empacado                        | Rápido<br>Contiene 10 veces más bacteria   | Costoso<br>Obstrucciones   |
| Laguna Cubierta                       | Bajo costo<br>No requiere movimiento ni calefacción<br>Volúmenes grandes   | Lento (más de 40 días)<br>No viable para codigestión<br>Solo partículas sólidas finas<br>Sólo para lugares cálidos |
| Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente | Rápido<br>No se agregan medios artificiales como en un lecho empacado.<br>Bueno para aguas residuales industriales | Costoso  |

## 5.2 Espacio geográfico

Los Estados Unidos Mexicanos, país con la onceava economía más grande del mundo (Central Intelligence Agency, 2011), cuenta con realidades económicas, climáticas y culturales sumamente diferentes dentro de su espacio territorial. Estas desemejanzas son históricas e implican variaciones considerables en las actividades económicas, disponibilidad de recursos, tipos de clima y, por ende, en la calidad de vida de sus habitantes (Viesti, 2015). La amplitud que ofrece el país ha dirigido a instituciones a agrupar Entidades Federativas según sus similitudes para facilitar su comprensión y estudio. Dicha segmentación junto con el análisis de diversas variables; incluyendo el Índice de Desarrollo Humano, el porcentaje de población en zonas rurales, la situación de pobreza y el acceso a energía en la vivienda, todo a nivel Estatal, fungirán como base y justificación de la selección geográfica del presente proyecto.

### 5.2.1 Regiones de México

La Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo (CONEVyT) ha segmentado a los Estados Unidos Mexicanos en siete regiones: Norte, Noroeste, Occidente, Central, Golfo, Sur y Península de Yucatán. El mapa que demuestra la segmentación se presenta en la Figura 17, cada región presenta características naturales y económicas singulares.

Los Estados en el Norte son Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas y Aguascalientes. La zona Noroeste se comprende de Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora. Dentro de la zona Occidente se encuentra Nayarit, Jalisco, Colima, y Michoacán, mientras que el Centro es Ciudad de México, Guanajuato, Hidalgo, Puebla, Morelos, Estado de México, Querétaro y Tlaxcala. La región Golfo es la suma de los Estados de Tamaulipas, Veracruz y Tabasco. El Sur cuenta con Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Por último, la región Península de Yucatán es Quintana Roo, Campeche, y por supuesto, Yucatán (CONEVyT, 2010).



**Figura 17.** Regiones económicas de México  
Elaboración propia con datos de CONEVyT (2010)

### Región Norte

La región norte tiene un poco más de 14 millones de habitantes. Los Estados que aportan mayor población a la zona son Nuevo León, San Luis Potosí y Chihuahua. El clima y relieve llegan a ser un reto para los asentamientos humanos y algunas actividades económicas, tales como la agricultura. Sin embargo, las presas han habilitado el establecimiento de zonas agrícolas y la capacidad de surtir agua en cualquier época del año en estos climas secos y semisecos (CONEVyT, 2010).

Dicha región cuenta con diversas actividades económicas; muchas influenciadas por cercanía y comunicación con los Estados Unidos de América. Entre las principales actividades económicas se encuentra la agricultura, con cultivos de manzana, nuez, durazno, por mencionar algunos, la ganadería de ganado bovino, ovino, caprino y porcino, la explotación forestal de las partes altas de las sierras, la minería y actividades industriales, maquiladoras específicamente en la zona fronteriza así como la industria cervecera, siderúrgica, papelera, etc. (CONEVyT, 2010).

## Región Noroeste

La región noroeste, o pacífico norte, también tiene frontera con los Estados Unidos de América y es una zona relativamente baja en densidad poblacional con tan sólo 18 habitantes por km<sup>2</sup>. El medio ambiente es caracterizado por sistemas de montañas que cruzan a los Estados Federativos de esta región y sus climas son en su mayoría secos y semisecos con comunidades vegetales incluyendo desierto, estepas, bosque tropical, bosque mixto y matorral (CONEVyT, 2010)

La actividad agrícola presente en la región noroeste es considerada de las más importantes del país, tierras fértiles y fácil acceso a ríos han permitido su éxito. Aunque los cultivos de trigo, algodón, jitomate, arroz, tabaco, uva y naranja, no es la única actividad económica. La ganadería, pesca, minería enfocada en la extracción de sal y la industria, enfocada en el empaquetado y congelado de productos del mar, son otras actividades que esta región ha desarrollado (CONEVyT, 2010).

## Región Occidente

Al estudiar la región occidente es posible encontrar mayor diversidad que la del norte y noroeste. Se encuentran sierras, llanuras costeras, valles y la depresión de Balsas. Los climas dominantes incluyen el templado, cálido y frío, generando un entorno adecuado para bosques de coníferas, bosque mixtos y sabanas. Es posible que los climas moderados y el relieve hayan permitido el asentamiento de grandes grupos. Lo cual explicaría la existencia de zonas conurbadas como Guadalajara, Morelia, Clima y Tlaquepaque, entre otras que suman una población de más de 11 millones con una densidad de 58 habitantes por km<sup>2</sup> (CONEVyT, 2010).

La región se caracteriza por diversas actividades productivas. Dentro de la agricultura destacan cultivos de maíz, sorgo, agave tequilero, mango, aguacate, plátano, coco, frijol, papaya, limón, caña de azúcar, tamarindo y guayaba. También existe la ganadería y la pesca, ésta última especialmente para el autoconsumo, la explotación forestal de cedro, encino y pino, minería e industria enfocada en la textil, de calzado, petroquímica, tequilera, etc. (CONEVyT, 2010)

## Región Central

La región con menor superficie es la central. Aún con este menor espacio, es la zona con la mayor actividad política, cultural y económica del país. Dentro de esta región habitan más de 34 millones de personas, lo cual es casi el 30% de la población de los Estados Unidos Mexicanos. Su relieve es montañosos, pero también cuenta con valles y llanos, lo cuales se acompañan con climas templados, semi secos y cálido tropical (CONEVyT, 2010).

La variación de densidad población entre Estados es substancial. La Ciudad de México, antes Distrito Federal, cuenta con 5,660 habitantes por km<sup>2</sup>, mientras que Hidalgo, Estado con menor densidad de la región tiene 101 km<sup>2</sup>. Una diferencia de más de 56 veces. Puede ser una ventaja tener alta densidad poblacional para economía de escalas, sin embargo, el crecimiento poco controlado en la Ciudad de México ha llevado a diversos problemas relacionados con la pobreza. Servicios básicos como la vivienda, educación, transporte, etc. son insuficientes para una gran proporción de la población (CONEVyT, 2010).

La saturación en la Ciudad de México no sólo está presente en sus habitantes sino también en la sección industrial. Por ello, autoridades federales y estatales lideraron un programa de descentralización el cual dio oportunidad de crecimiento a ciudades cercanas tales como Toluca, Puebla y León que se encuentran cercanas pero no dentro de Ciudad de México. Dentro de las actividades económicas destacan la agricultura con el cultivo de maíz, frijol, café, alfalfa, tomate, mango, durazno, fresa, sorgo, trigo, caña de azúcar y legumbres, la ganadería fuertemente con las productoras de aves de corral, la explotación forestal de pino, roble verde y oyamel, minería de oro, plata, mercurio, cobre, fluoruro y sulfuro, y finalmente la industria minera textil, alimentario, autotransporte, metalmecánica, ensamblajes de vagones del metro, automotriz, petroquímica, cementera, etc. (CONEVyT, 2010)

## Región Golfo

La región del golfo cuenta con dos tipos de relieves: planas y montañosas; reflejándose en climas tropicales y semi secos. Los Estados en la sección sur del golfo son lluviosos, con ríos caudalosos y mucha vegetación, sobre todo en el Estado de Tabasco, mientras que la sección norte se presentan estepas y matorrales (CONEVyT, 2010).

Más de 11 millones de personas habitan en esta región, aunque el Estado de Veracruz es el Estado con mayor población. Los grupos étnicos presentes son: otomí, totonaca, popoluca de Veracruz, huasteco, chontales de Tabasco y nahua. Esta región se considera privilegiada considerando la variedad de productos que se pueden obtener del mar y la riqueza petrolera (CONEVyT, 2010).

La agricultura de maíz, caña de azúcar, naranja, plátano, tabaco, alfalfa, jitomate, café, cacao es una actividad productiva de la región del golfo. También, la ganadería específicamente de ganado bovino y caballar, la explotación de encino y madera tropicales, la pesca de robalo, ostión guachinango, sardina y camarón, y la minería. Por la variedad de actividades económicas, los Estados que conforman esta región se encuentra sumamente comunicada con el resto del país (CONEVyT, 2010).

### Región Sur

El relieve de la región sur es principalmente montañoso debido a la Sierra Madre del Sur que va paralela a la línea costera. Aunque la vegetación incluye estepas, bosques tropicales, bosque mixto y selva con un clima semi seco, tropical y templado.

La población de esta región se distribuye en ciudades y zonas rurales en mayor proporción que otras regiones. Dentro de los más de 9 millones de habitantes en el sur, se ubican una gran variedad de grupo indígenas tales como chocho, mazateca, mixteca, zapoteca, huave, chol, mixe, entre otras. Esta zona es la menos desarrollada y pobre del país. Inclusive, un amplio sector no cuenta con servicios básico.

Existe la actividad agrícola pero es limitada debido a las inclinaciones de las tierras junto con la falta de obras hidráulicas. Los cultivos más comunes son de café, caña de azúcar, ajonjolí, algodón, maíz, plátano, cacao, tabaco y henequén. La explotación forestal es común sobre todo en Chiapas, mientras que la pesca de camarón, atún, ostión, robalo y huachinango es más común en Oaxaca (CONEVyT, 2010).

## Región Península de Yucatán

La región de la Península de Yucatán se encuentra rodeada por agua, sea por el Golfo de México, el Canal de Yucatán o el Mar de las Antillas. Su clima es principalmente cálido pero con lluvias ocasionales durante el verano. Casi toda la zona cuenta con sabana y estepa (CONEVyT, 2010).

Esta región con casi 3 millones de habitantes es baja en densidad poblacional, con 17 habitantes por km<sup>2</sup>. La población indígena es principalmente del grupo maya y las actividades de la región son en su mayoría del sector primario, similar a la realidad de la región sur. La pesca es una de las principales actividades que contribuye a la economía. Aunque también existe la ganadería bovina, la explotación forestal de maderas preciosas y algunos cultivos agrícolas, sin ser tan importantes como la actividad principal: el turismo (CONEVyT, 2010).

### 5.2.2 Índice de Desarrollo Humano

La calidad de vida de la población puede ser medida a través del Índice de Desarrollo Humano (IDH), mecanismo creado por el Programa de las Naciones Unidas (PNUD). Este Índice, calculado por la calidad de ingresos, educación y salud, se refleja en valores numéricos entre el 0 y el 1. Entre más cercano sea el valor a 1, mayor es la calidad de vida de los habitantes. De manera opuesta, entre más alejado sea el valor a 1, menor es la calidad de vida de los habitantes.

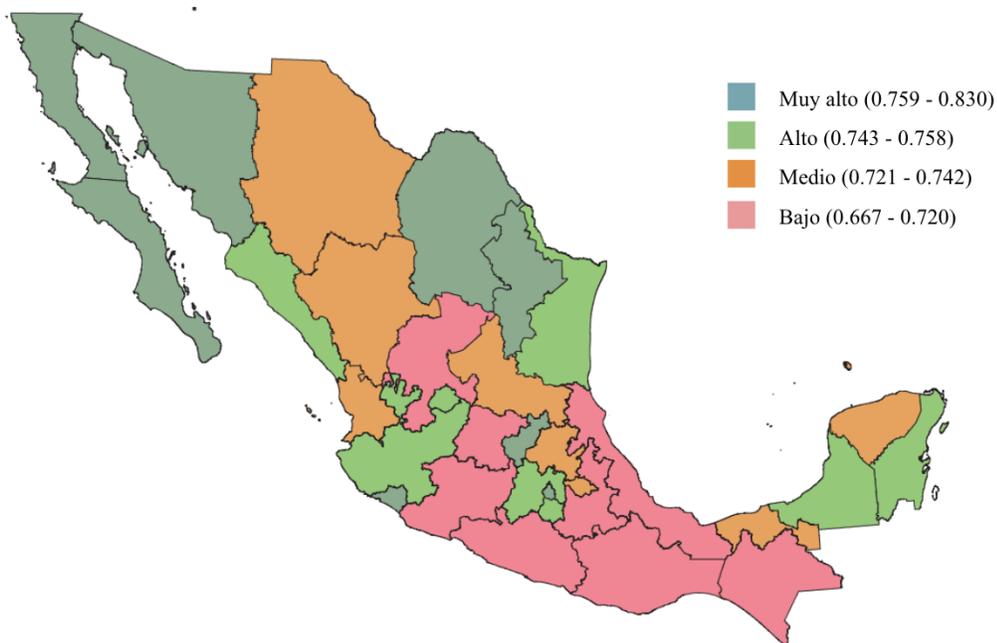
El promedio mundial de IDH es de 0.700, el de Latinoamérica y el Caribe de 0.739 y de México 0.746 (PNUD, 2015). Este panorama general podrá llevar al concepto de que la calidad de vida en el país es mejor a otras naciones en economías similares. Sin embargo, estudiando el nivel de desarrollo humano a nivel estatal, se descubre que existen grandes diferencias entre las Entidades Federativas (Tabla 6). El Estado con el valor de IDH más alto es Ciudad de México con 0.830, 0.139 más alto que el IDH mundial. Mientras que el Estado con el valor más bajo es Chiapas con 0.667; valor 0.037 más bajo que el promedio mundial. Entre ellos, Ciudad de México y Chiapas existe una diferencia de 1.49, demuestra las desigualdades económicas entre las regiones del país.

**Tabla 6.** Índice de Desarrollo Humano en los Estados Federativos de México en el 2015.

(Elaboración propia con datos de PNUD, 2015) (de mayor a menor)

| <b>Estado</b>       | <b>IDH</b> | <b>Nivel</b> | <b>Estados</b>  | <b>IDH</b> | <b>Nivel</b> |
|---------------------|------------|--------------|-----------------|------------|--------------|
| Ciudad de México    | 0.830      | Muy alto     | Tabasco         | 0.742      | Medio        |
| Nuevo León          | 0.790      | Muy alto     | Yucatán         | 0.739      | Medio        |
| Sonora              | 0.779      | Muy alto     | Chihuahua       | 0.734      | Medio        |
| Baja California Sur | 0.776      | Muy alto     | Nayarit         | 0.733      | Medio        |
| Coahuila            | 0.768      | Muy alto     | Durango         | 0.731      | Medio        |
| Colima              | 0.763      | Muy alto     | Tlaxcala        | 0.727      | Medio        |
| Querétaro           | 0.760      | Muy alto     | San Luis Potosí | 0.726      | Medio        |
| Baja California     | 0.760      | Muy alto     | Hidalgo         | 0.723      | Bajo         |
| Aguascalientes      | 0.760      | Alto         | Zacatecas       | 0.720      | Bajo         |
| Tamaulipas          | 0.758      | Alto         | Guanajuato      | 0.720      | Bajo         |
| Sinaloa             | 0.757      | Alto         | Puebla          | 0.717      | Bajo         |
| Quintana Roo        | 0.754      | Alto         | Veracruz        | 0.713      | Bajo         |
| Jalisco             | 0.751      | Alto         | Michoacán       | 0.700      | Bajo         |
| Morelos             | 0.749      | Alto         | Oaxaca          | 0.681      | Bajo         |
| Campeche            | 0.749      | Alto         | Guerrero        | 0.679      | Bajo         |
| Estado de México    | 0.745      | Alto         | Chiapas         | 0.667      | Bajo         |

Al representar los datos de la Tabla 6 en un mapa se obtiene la Figura 18. Se puede observar la distribución de las Entidades con los cuatro diferentes niveles de IDH; muy alto, alto, medio y bajo. La clasificación se decide según su valor de IDH, para el muy alto se consideran los Estados calificados con un valor entre 0.759 y 0.830, para el alto entre 0.743 y 0.758, para el medio entre 0.721 - 0.742 y el bajo entre 0.667 y 0.720.



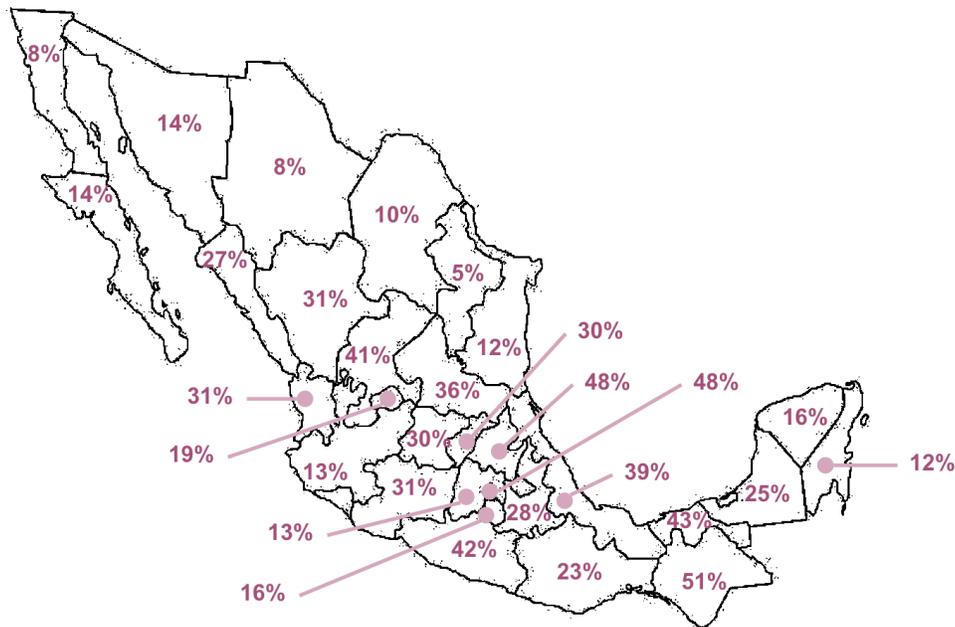
**Figura 18.** Nivel de desarrollo humano por Entidad Federativa.  
Imagen recuperada de PNUD (2015)

Los cuatro niveles de clasificación de IDH están distribuidos en las 7 regiones de México. El nivel bajo de IDH tiene incidencias en las regiones Sur, Golfo, Occidente, Norte y Central. El nivel medio se presenta en la región Golfo, Península de Yucatán, Norte, Noroeste y Occidente. El nivel alto tiene incidencias en las regiones de Península de Yucatán, Norte, Central, Golfo, Occidente y Noroeste. Los Estados con un nivel muy alto de IDH se encuentran en la región Central, Noroeste, Norte y Occidente.

Aún cuando hay una distribución de los cuatro niveles en las siete regiones, hay situaciones que captan un interés particular. Por ejemplo, el nivel bajo de IDH prevalece en los Estados de las regiones sur y central. Aunque en el caso de la región sur, la totalidad de los estados que la conforman se encuentran en dicho nivel. Ahora, observando el nivel muy alto cubre casi la totalidad de la región Noroeste y un par de Estados del Norte.

### 5.2.3 Población en zonas rurales

La cantidad de habitantes en zonas rurales varía según la Entidad Federativa y existen diferencias de hasta 46%. La Figura 19 representa el porcentaje de población habitante en localidades rurales por cada Estado. Los Estados con mayor porcentaje de población en localidades rurales son Chiapas, Hidalgo, Tabasco, Guerrero y Veracruz con un 51%, 48%, 43%, 42% y 39% de la totalidad de su población, respectivamente. Mientras que los Estados con menor población habitando en zonas rurales son Nuevo León, Chihuahua, Baja California, Quintana Roo y Tamaulipas con 5%, 8%, 8%, 12% y 12%, respectivamente.



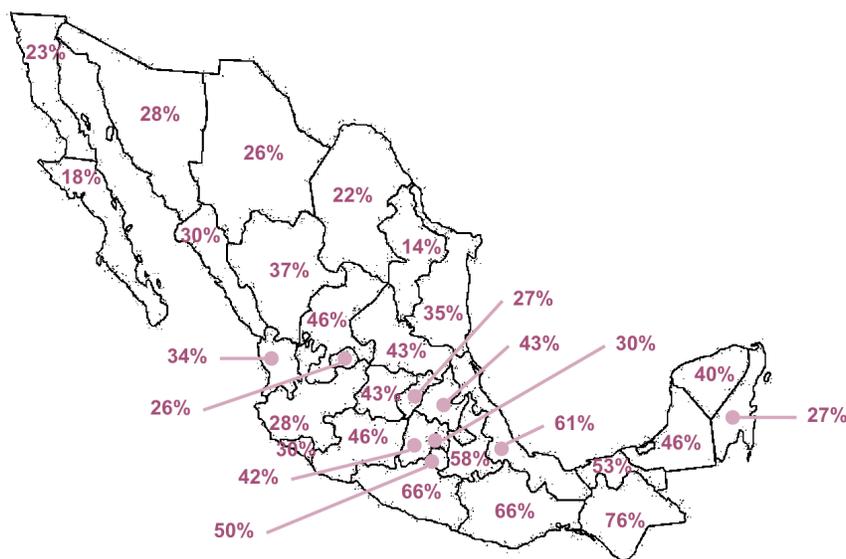
**Figura 19.** Porcentaje de población habitando en zona rurales por Estado.  
Elaboración propia con datos de INEGI (2010)

### 5.2.4 Pobreza

El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) es el organismo público descentralizado en México encargado de brindar información sobre la situación de pobreza en el país. Su metodología consiste en evaluar este problema multidimensional por medio de seis variables: rezago educativo, calidad y espacio de vivienda, servicios básicos en la vivienda, acceso a servicios de salud, acceso a seguridad social y acceso a

la alimentación para clasificar la población viviendo en pobreza, pobreza moderada o pobreza extrema (CONEVAL, s/f).

La definición de pobreza consiste en aquella persona que carezca de al menos una de las seis variables. Cuando hay carencia de tres o más se clasifica como pobreza extrema. Por lo tanto la totalidad de habitantes viviendo en situación de pobreza menos la cantidad de habitantes en pobreza extrema resulta la cantidad de habitantes en pobreza moderada (CONEVAL, s/f).



**Figura 20.** Porcentaje de habitantes viviendo en situación de pobreza por Estado. Elaboración propia con datos de CONEVAL (2018)

La Figura 20 representa el porcentaje de habitante viviendo en pobreza por Entidad Federativa. Los porcentajes más altos se encuentran en los Estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Veracruz y Puebla con 76%, 66%, 66%, 61% y 58%, respectivamente. La parte opuesta, con los porcentajes más bajos son los Estados de Nuevo León, Baja California Sur, Coahuila de Zaragoza, Baja California, Aguascalientes y Chihuahua con 14%, 18%, 22%, 23%, 26% y 26%, respectivamente.

### 5.2.5 Acceso a Energía

Dentro de las seis dimensiones que miden la pobreza se encuentra el acceso a los servicios básicos de la vivienda. CONEVAL considera que se carecen servicios básicos si sucede

al menos una de las siguientes situaciones: el agua se obtiene de pozo, pipa, río o de otra vivienda, no cuenta con servicio de drenaje, no cuenta con abastecimiento de energía eléctrica o el combustible para cocinar es leña o carbón sin chimenea.

Considerando la selección de la tecnología y su potencial de brindar calor o electricidad, se profundiza en estadísticas relacionado al acceso de la energía en las regiones. Para ellos, se elabora la Tabla 7 que representa la cantidad de viviendas sin acceso a energía por Estado.

**Tabla 7.** Cantidad de Viviendas sin Acceso a Energía Eléctrica por Entidad Federativa.  
(Elaboración propia con datos de INEGI, 2010).

| <b>Estado</b>                   | <b>Cantidad de Viviendas sin Acceso a Energía</b> |
|---------------------------------|---|
| Veracruz de Ignacio de la Llave | 62,388  |
| Oaxaca                          | 48,857  |
| Chiapas                         | 39,479  |
| Guerrero                        | 36,656  |
| Estado de México                | 30,056  |
| Chihuahua                       | 29,098  |
| San Luis Potosí                 | 26,059  |
| Puebla                          | 25,569  |
| Guanajuato                      | 19,954  |
| Hidalgo                         | 18,996  |
| Michoacán de Ocampo             | 18,648  |
| Tamaulipas                      | 15,393  |
| Jalisco                         | 14,871  |
| Durango                         | 14,222  |
| Sonora                          | 13,352  |
| Yucatán                         | 10,155  |
| Baja California                 | 9,463   |

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Querétaro            | 9,275 |
| Nayarit              | 8,783 |
| Sinaloa              | 8,696 |
| Tabasco              | 7,651 |
| Quintana Roo         | 7,441 |
| Campeche             | 6,475 |
| Zacatecas            | 5,688 |
| Baja California Sur  | 5,408 |
| Coahuila de Zaragoza | 5,064 |
| Morelos              | 4,462 |
| Nuevo León           | 4,689 |
| Tlaxcala             | 3,278 |
| Ciudad de México     | 2,256 |
| Aguascalientes       | 1,923 |
| Colima               | 1,380 |

### 5.2.6 Selección de región de estudio

Con la información presentada en las secciones 2.1 y 2.2, se recopiló la Tabla 7. para visualizar de una manera panorámica las necesidades de cada Estado y de las siete diferentes regiones. Adicionalmente se remarcaron las cinco Entidades Federativas con mayor vulnerabilidad para cada variable estudiada (Tabla 7).

**Tabla 8.** Porcentaje de población en zonas rurales, IDH, porcentaje de habitantes viviendo en pobreza y cantidad de viviendas sin acceso a energía por Entidad Federativa.

| Estado | Población en Zonas Rurales (INEGI, 2010) | IDH (PNUD, 2015) | Población en Pobreza (CONEVAL, 2018) | Cantidad de Viviendas sin Acceso a Energía (INEGI, 2010) |
|--------|--|------------------|--------------------------------------|--|
|        |  | Sur              |                                      |  |

|                                 |      |       |      |        |
|---------------------------------|------|-------|------|--------|
| Chiapas                         | 51%  | 0.667 | 76.4 | 39,479 |
| Guerrero                        | 42%  | 0.679 | 66.5 | 36,656 |
| Oaxaca                          | 23%  | 0.681 | 66.4 | 48,857 |
| Golfo                           |      |       |      |        |
| Tabasco                         | 43%  | 0.742 | 53.6 | 7,651  |
| Tamaulipas                      | 12%  | 0.758 | 35.1 | 15,393 |
| Veracruz de Ignacio de la Llave | 39%  | 0.713 | 61.8 | 62,388 |
| Central                         |      |       |      |        |
| Ciudad de México                | 0.5% | 0.830 | 30.6 | 2,256  |
| Estado de México                | 13%  | 0.745 | 42.7 | 30,056 |
| Guanajuato                      | 30%  | 0.720 | 43.4 | 19,954 |
| Morelos                         | 16%  | 0.749 | 50.8 | 4,462  |
| Hidalgo                         | 48%  | 0.723 | 43.8 | 18,996 |
| Puebla                          | 28%  | 0.717 | 58.9 | 25,569 |
| Querétaro                       | 30%  | 0.760 | 27.6 | 9,275  |
| Tlaxcala                        | 20%  | 0.727 | 48.4 | 3,278  |
| Occidente                       |      |       |      |        |
| Colima                          | 11%  | 0.763 | 30.9 | 1,380  |
| Jalisco                         | 13%  | 0.751 | 28.4 | 14,871 |
| Michoacán de Ocampo             | 31%  | 0.700 | 46   | 18,648 |
| Nayarit                         | 31%  | 0.733 | 34.8 | 8,783  |
| Península de Yucatán            |      |       |      |        |
| Campeche                        | 25%  | 0.749 | 46.2 | 6,475  |
| Quintana Roo                    | 12%  | 0.754 | 27.6 | 7,441  |
| Yucatán                         | 16%  | 0.739 | 40.8 | 10,155 |

| Noroeste             |     |       |      |        |
|----------------------|-----|-------|------|--------|
| Baja California Sur  | 14% | 0.776 | 18.1 | 5,408  |
| Sinaloa              | 27% | 0.757 | 30.9 | 8,696  |
| Sonora               | 14% | 0.779 | 28.2 | 13,352 |
| Norte                |     |       |      |        |
| Chihuahua            | 15% | 0.734 | 26.3 | 29,098 |
| Coahuila de Zaragoza | 10% | 0.768 | 22.5 | 5,064  |
| Durango              | 31% | 0.731 | 37.3 | 14,222 |
| Nuevo León           | 5%  | 0.790 | 14.5 | 4,689  |
| San Luis Potosí      | 36% | 0.726 | 43.4 | 26,059 |
| Zacatecas            | 41% | 0.720 | 46.8 | 5,688  |

Los Estados con mayor vulnerabilidad son Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Veracruz. Estos cuatro Estados se encuentran en los extremos negativos de cada una de las cuatro variables. La selección de la región para desarrollar el presente proyecto sucede a partir de la zona con mayor incidencia de vulnerabilidad. Para ello, se elaboró la Tabla 8, contabilizando la cantidad de Estados con mayor vulnerabilidad por variable.

**Tabla 9.** Cantidad de Estados por región con IDH bajo, mayor población en localidades rurales, mayor población en situación de pobreza y menor población con acceso a energía.

| Región               | Localidades Rurales | IDH      | Pobreza  | Acceso a Energía |
|----------------------|---------------------|----------|----------|------------------|
| <b>Sur</b>           | <b>2</b>            | <b>3</b> | <b>3</b> | <b>3</b>         |
| Golfo                | 1                   | 1        | 1        | 1                |
| Central              | 1                   |          | 1        | 1                |
| Occidente            |                     | 1        |          |                  |
| Noroeste             | 1                   |          |          |                  |
| Península de Yucatán |                     |          |          |                  |
| Norte                |                     |          |          |                  |

La zona Sur, que incluye los Estados de Chiapas, Guerrero y Oaxaca, es el área con mayor porcentaje de población viviendo en localidades rurales, así como, con mayor vulnerabilidad con respecto al IDH, pobreza y acceso a energía. La zona del Golfo queda detrás del Sur e incidiendo solo con un Estado en cada uno de los rubros analizados. Posterior al Golfo se encuentra la zona Central. Resulta similar al anterior pero sin la incidencia en el IDH. Las siguientes dos zonas, Occidente y Noreste, solo cuentan con una sola incidencia cada una; en el IDH y el porcentaje de localidades rurales, respectivamente. Finalmente la zona de Península de Yucatán y Norte, no cuentan con Estados en vulnerabilidad con los parámetros estudiados.

## 6. Herramienta de Selección

La herramienta de selección asistirá a tomadores de decisión y técnicos en las municipalidades del Sur de México durante la planeación de la gestión integral de residuos sólidos en localidades rurales. Por medio de esta herramienta, responsables del manejo de residuos, podrán considerar la implementación del proceso de digestión anaerobia, aún cuando no sean especialistas en el tema. También, técnicos podrán revisar detalles del diseño y sus variables de operación. Este instrumento busca contribuir a la aceleración de proyectos que utilicen el proceso de digestión anaerobia para mejorar la calidad de vida de los habitantes, reducir emisiones al medioambiente y brindar tratamiento biológico a diferentes tipos de biomasa.

La herramienta se elabora con consideraciones locales (ver Anexo A) y se estructura en tres partes (Figura 21). Durante la primera fase, el lector se auxilia de sistemas de información geográfica para la localización y dimensionamiento de la existencia de los diferentes tipos de biomásas disponibles en la zona. Posterior a ello, una matriz de decisión orienta al lector acerca de la aplicabilidad de los diferentes tipos de digestores para un sitio determinado. Una vez que se preseleccione una variante de la tecnología, el técnico, la consultora o la firma de ingeniería se puede apoyar de la última fase de la herramienta, una matriz técnica. Éste último componente incluye parámetros del proceso y su idealidad de cumplimiento por cada tipo de digestor.



**Figura 21.** Proceso de herramientas para la toma de decisiones

### 6.1 Sistema de Información Geográfica

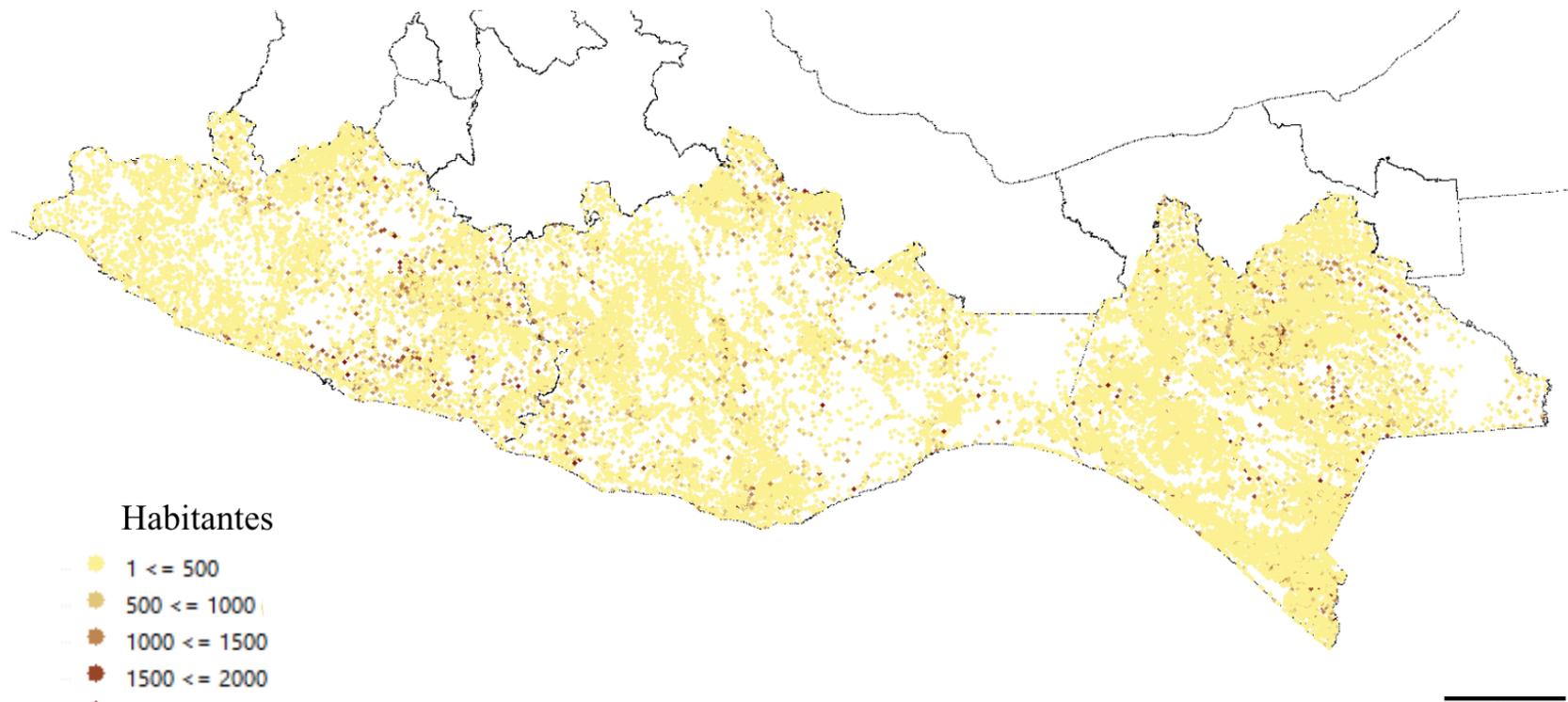
Con apoyo del Mapa Digital de INEGI, se analizó la existencia de los diferentes tipos de biomasa en cada uno de los Estados del Sur. Las figuras generadas serán la primera guía y panorama para visualizar la existencia de residuos orgánicos en los tres Estados de estudio

(Chiapas, Guerrero y Oaxaca). La información se plasmará por Estado y de manera directa o indirecta mostrará la dimensión, por ende, potencial de aprovechamiento de los diferentes tipos de biomasa para el proceso de digestión anaerobia.

Para la elaboración de los mapas, se consultaron y procesaron datos de diversos censos y encuestas en el territorio nacional. La información utilizada es principalmente a nivel de localidad rural o por municipio, según se encuentren disponibles. Estos datos servirán como referencia pero deben considerarse su actualización e incertidumbre.

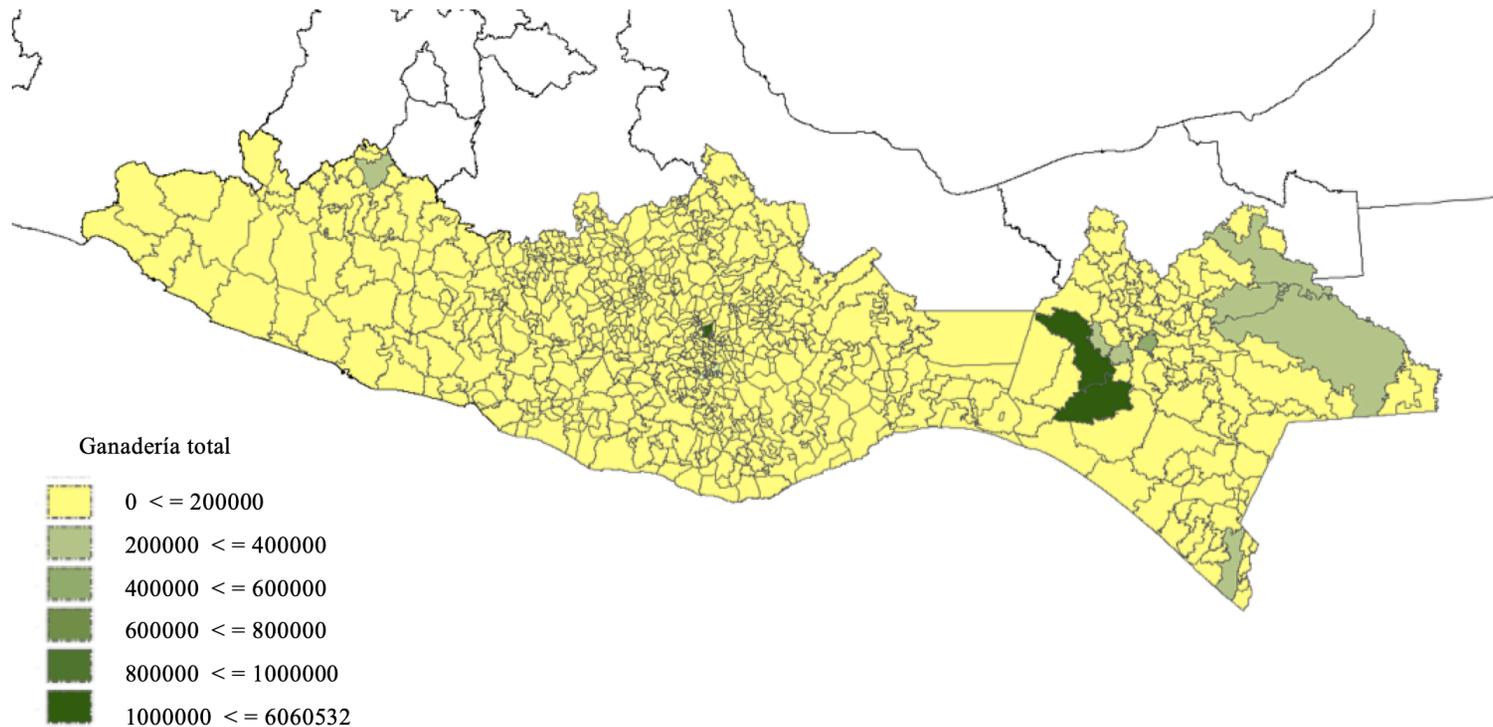
### 6.1.1 Fracción orgánica de residuos sólidos municipales

Para obtener un aproximado de la generación de residuos sólidos en cierta localidad es posible analizar los datos poblacionales. Mediante la Figura 22, se visualiza la ubicación exacta de localidades rurales en el Sur de México, así como también el tamaño de estas poblaciones. La mayoría de las localidades rurales en Chiapas, Oaxaca y Guerrero oscilan entre 1 y 500 habitantes, muy pocas pasan los 500 habitantes.



### 6.1.2 Estiércol de ganado

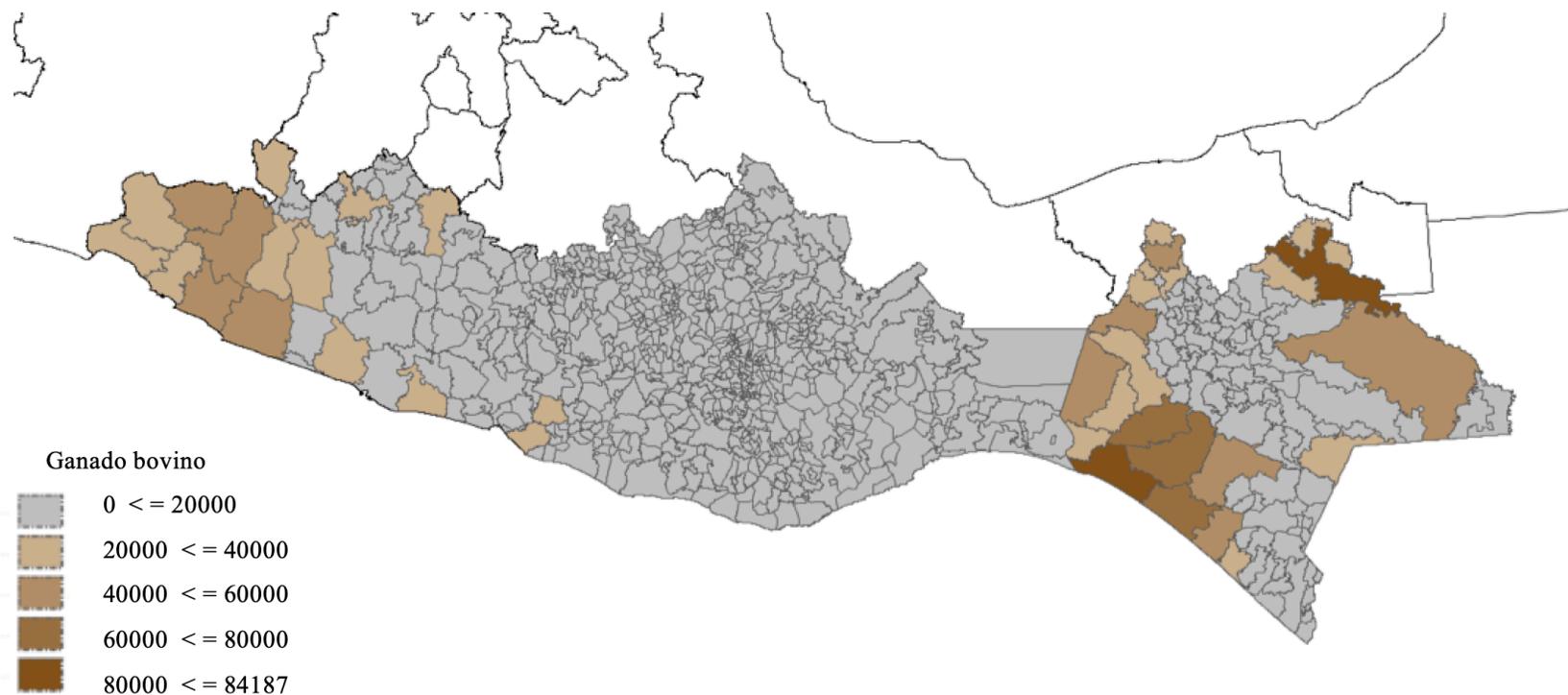
La cuantificación de la población total ganadera consiste en la suma de la población bovina, porcina, ovina y las aves de corral en cada uno de los municipios del Sur de México (Figura 23). Un municipio en Chiapas y otro en Oaxaca tienen más de 1,000,000 de animales. Por otra parte, seis municipios de Chiapas, y un par en Oaxaca y Guerrero cuentan con poblaciones entre 200,000 a 400,000. Sin embargo, la mayoría de los municipios, aquellos en amarillo, cuentan con una población de animales que oscila entre 0 y 200,000.



**Figura 23.** Población de ganado

### 6.1.3 Estiércol de ganado bovino

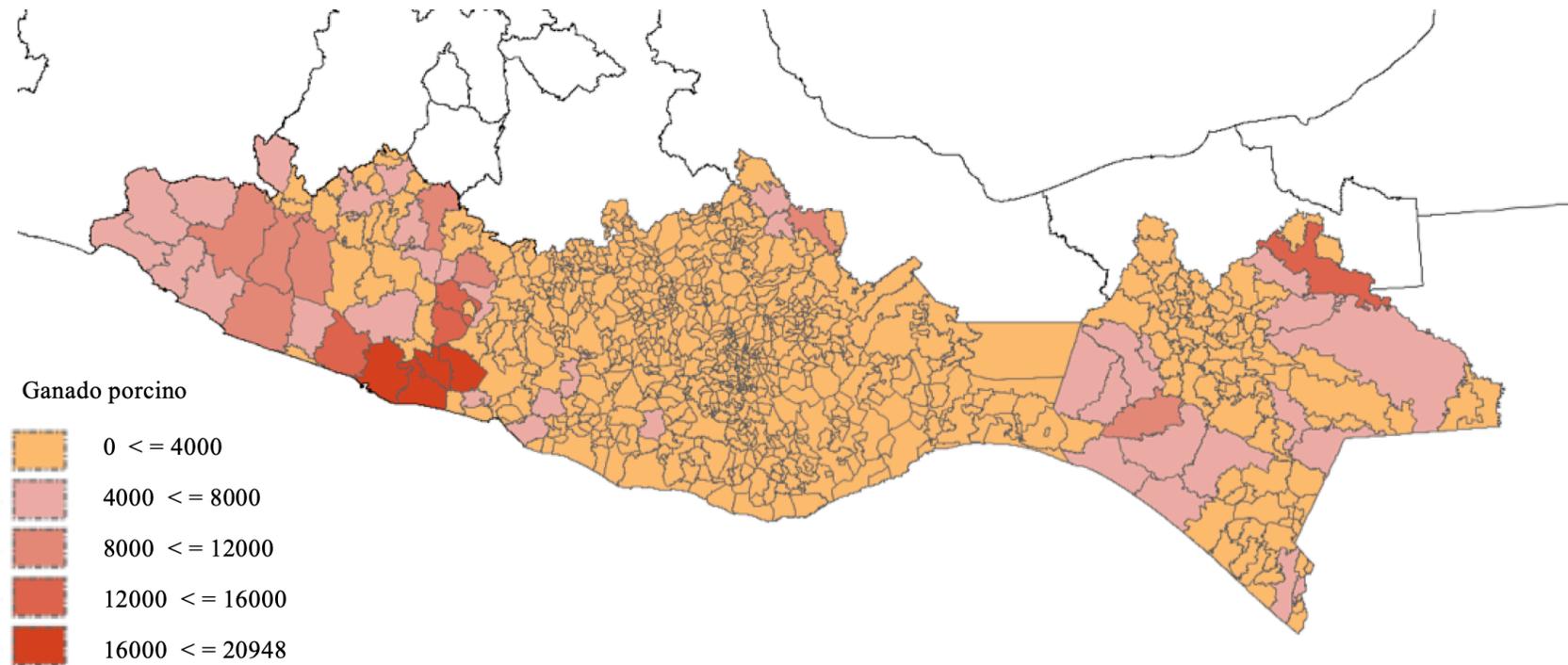
La Figura 24 permite ubicar con precisión la ubicación del ganado bovino. El rango de población bovina más común en la zona del Sur es entre 0 a 20,000 cabezas por municipio, marcado en color gris. Municipalidades con poblaciones mayores a 60,000 se encuentran únicamente en Chiapas. Aquellos con población bovina entre 40,000 y 60,000 se ubican en los tres Estados, aunque sólo un par en Oaxaca.



**Figura 24.** Distribución de población de ganado bovino (cabezas).

#### 6.1.4 Estiércol porcino

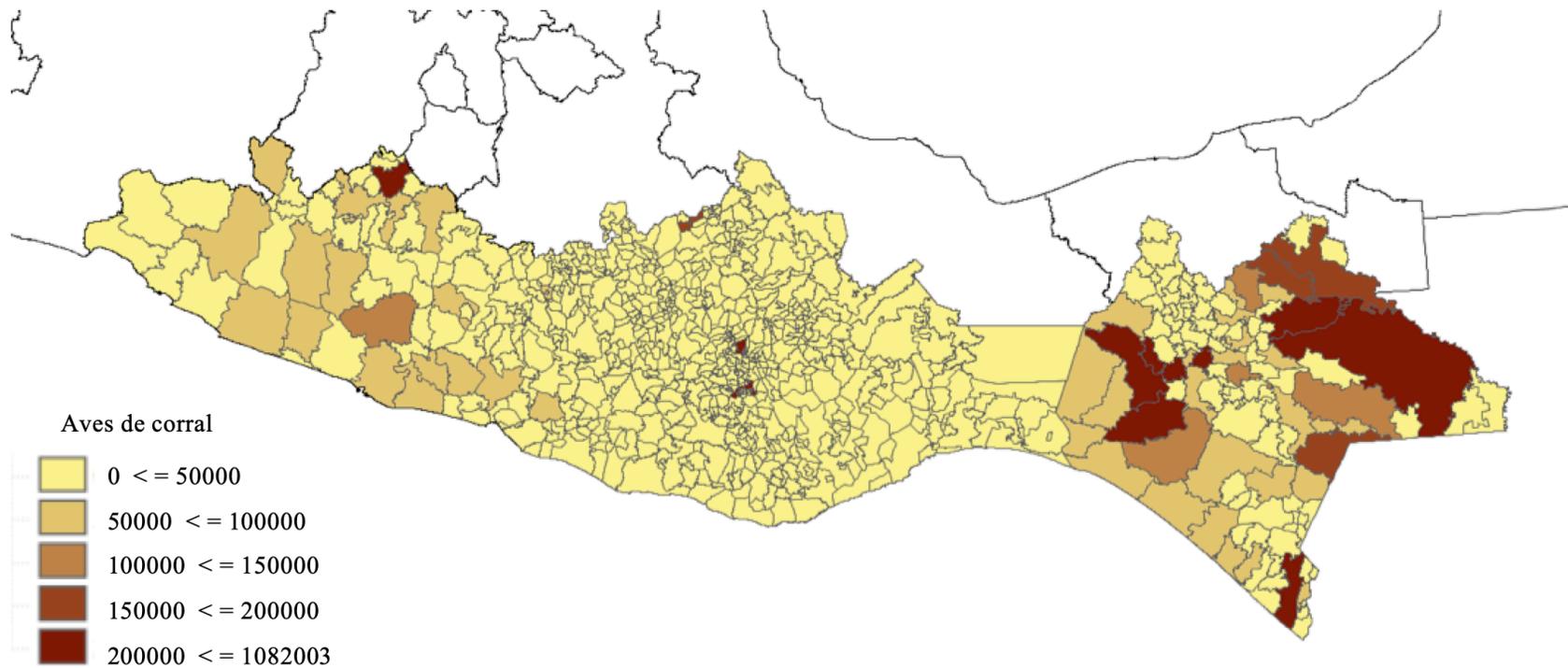
La Figura 25 representa la población porcina en la región del Sur de México. La mayoría de los municipios tienen una población de 0 a 4,000 animales, aquellos sombreados en naranja. Alrededor de treinta municipios en la zona Sur cuentan con poblaciones porcinas entre 4,000 y 8,000, siete municipios con poblaciones entre 8,000 y 12,000, tres municipios con poblaciones entre 12,000 y 16,000 y tan sólo cuatro con poblaciones porcinas mayores a 16,000.



**Figura 25.** Distribución de población de ganado porcino (cabezas).

### 6.1.5 Estiércol de aves de corral

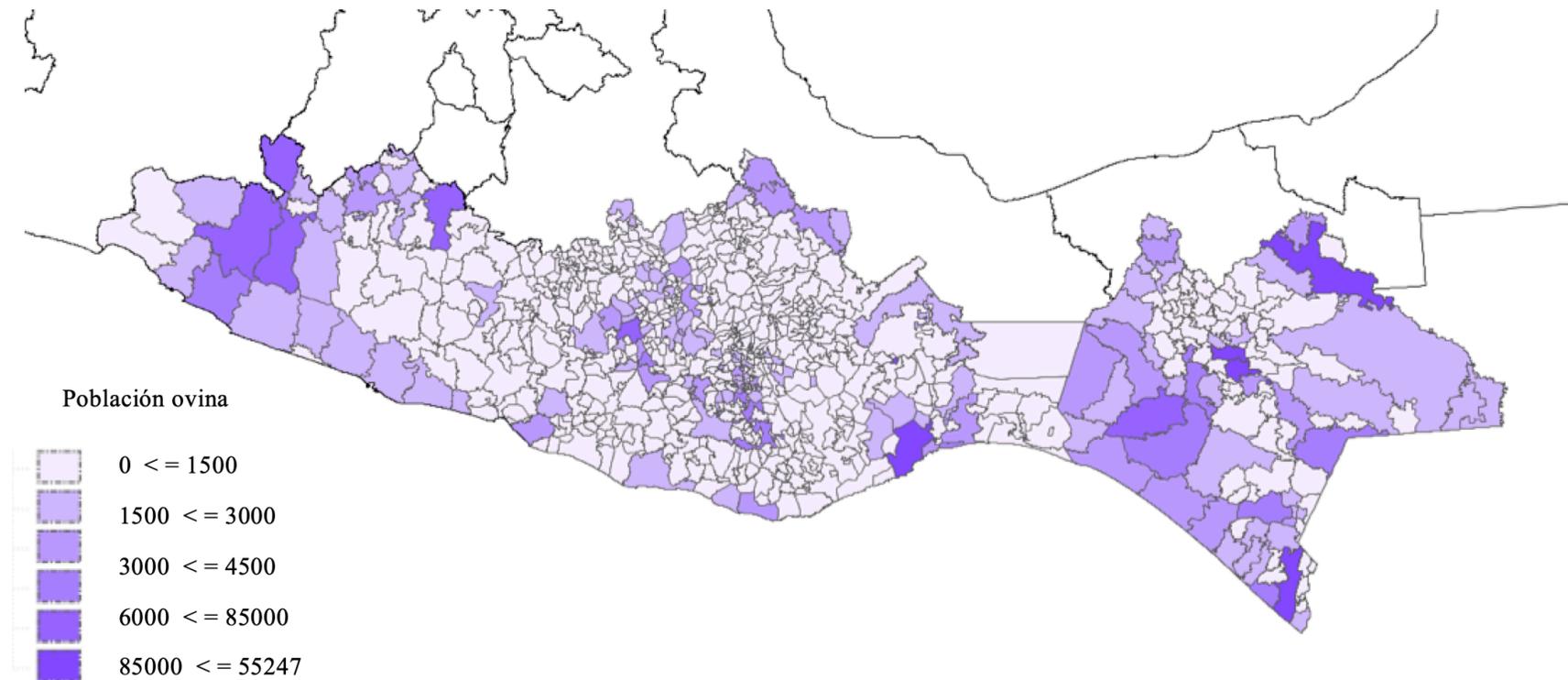
Las suma de la población de gallos, gallinas, pollos, guajolotes, patos, gansos y codornices generan la población total de aves de corral. Al observar el mapa en la Figura 26, destaca que cuatro municipios en Chiapas, uno en Guerrero y cuatro en Oaxaca cuentan con una población mayor a 200,000 aves. La gran mayoría de los municipios en el Sur de México cuentan con poblaciones entre 0 y 50,000 aves.



**Figura 26** . Distribución de población de aves de corral.

### 6.1.6 Estiércol ovino

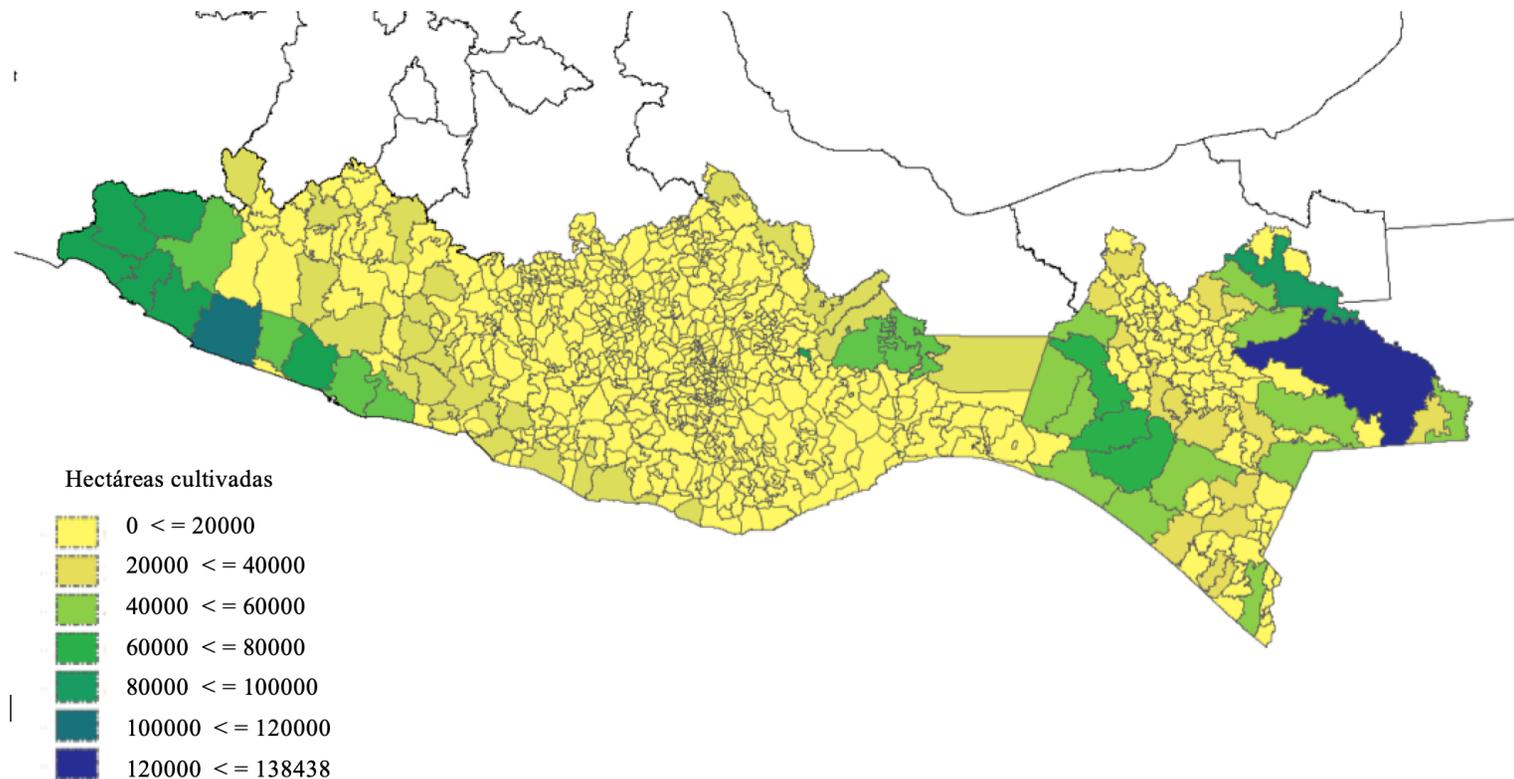
Por medio de la Figura 27. se visualiza la población ovina en Chiapas, Oaxaca y Guerrero. En comparación con las Figuras anteriores, los municipios de los tres Estados cuentan con una mayor distribución de los seis rangos de poblaciones. Es notable que los municipios con más de 8,500 cabezas son menos de cinco. La gran mayoría de los municipios cuentan con 1,500 o menos animales de ganado ovino.



**Figura 27.** Distribución de población ovina.

### 6.1.7 Cosechas y residuos de cosechas

La Figura 28. representa las hectáreas cultivadas en los municipios de los tres Estados del Sur de México. Chiapas tiene el único municipio con más de 120,000 hectáreas cultivadas y Guerrero el único entre 100,000 y 120,000 de área cultivada. Guerrero y Chiapas tienen mayor cantidad de municipios en verde, entre 40,000 y 100,000 hectáreas cultivadas, que Oaxaca. Los municipios de este último Estado cuentan en su mayoría entre 0 a 20,000 hectáreas cultivadas.



**Figura 28.** Área cosechada (ha) por municipalidad.

## 6.2 Criterios y Matriz de Decisión

La matriz de decisión está compuesta por cuatro partes: generación de residuos, gestión de residuos, clima y geografía, y operación. Para cada etapa, el tomador de decisión puede trabajar con todos los tipos de digestores (cuatro columnas), o bien, con solo uno o un par de ellos. La matriz es flexible a ser utilizada como herramienta para evaluar la viabilidad de un solo tipo de digestor, para comparar entre dos, o evaluar todos.

Para cada fila, se debe marcar sólo uno de los cuadros posibles en cada una de las columnas a evaluar. La explicación y lógica de cada parámetro se explica al inicio de cada sección.

Una vez que termine la evaluación por todos los parámetros. El tomador de decisión hace un conteo de lo cuadros marcados en color verde, amarillo y rojo por columna. Apoyado de la Tabla 10, interpretará si el proceso de digestión anaerobia será adecuado para el caso en estudio.

**Tabla 10.** Interpretación de resultados de la matriz de decisión

| <b>Resultados</b>               | <b>¿La tecnología es recomendada?</b>   |
|---------------------------------|---|
| Todos los parámetros en verde   | La tecnología es recomendada.<br>Proceder a verificar el proyecto a partir de la matriz técnica.  |
| Parámetros en verde y amarillo. | La tecnología parece ser favorable en su situación, sin embargo, los parámetros en amarillo y sus recomendaciones deberán ser investigadas antes de proceder. |
| Uno o más parámetros en rojo    | La tecnología no es recomendada en las circunstancias actuales.   |

### 6.2.1 Generación

La sección de generación hace referencia a la cantidad de residuos y la temporalidad en la que se tendrá a disposición. Las consideraciones incluyen:

- Cantidad de residuos:

¿Cuál es la cantidad de residuos disponibles diariamente?

La cantidad de generación deberá ser reconocida para evaluar la viabilidad de instalar un biodigestor. Los beneficios obtenidos de los productos (biogás y/o digestato) deberán cubrir y sobrepasar los costos monetarios y el tiempo invertido en la manutención del sistema. La referencia para este criterio será que la cantidad de generación sea suficiente para suplir a una familia promedio (Ver Anexo B) de biogás. Martí (2008) recomienda que en el caso del estiércol bovino se deberá contar con 20 kg; equivalente a 3 o 4 vacas de pastoreo o un par en establo. Para el cálculo de la generación mínima requerida para el resto de los tipos de biomasa, se considera un promedio del potencial de generación de biogás y su equivalente para el consumo promedio de una familia (ver cálculos en Anexo C).

En caso de no contar con la generación recomendada por medio de un sólo tipo de residuos, en algunos tipos de digestores se recomienda la codigestión. Esto significa que se podría investigar la posibilidad de mezclar diferentes tipos de residuos para que el digestor logre suplir de biogás a una familia promedio diariamente.

- Temporalidad:

¿Los residuos están disponible de manera continua o discontinua?

Cuando la generación de la biomasa se presenta de manera semicontinua y/o en cantidades pequeñas, los reactores diseñados para ser alimentados de manera continua no serán ideales. Existe la posibilidad de instalar un sistema discontinuo o también conocido como *batch*. Para considerar la generación continua deberá generar la cantidad mínima de biomasa del parámetro anterior, diariamente.

### 6.2.2 Gestión de residuos

Buscando el funcionamiento óptimo de un digestor anaerobio, se recomienda contar un sistema de gestión. Una vez que existan procesos sistemáticos para el manejo de residuos, será mucho más probable que funcione la incorporación del tratamiento biológico.

- GIRS:

¿La localidad cuenta con una gestión integral de residuos sólidos?

La Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) es aquel plan para cumplir objetivos en el ámbito de residuos sólidos en todas las fases: generación, almacenamiento, recolección, tratamiento y disposición final. En caso de no contar con uno, es totalmente recomendable su implementación para reconocer las necesidades del sitio e integrar el proyecto de digestión anaerobia de la manera más estructurada posible.

- Riesgo de contaminación:

¿Los residuos se pueden recuperar sin riesgo a contaminación?

El proceso de digestión anaerobia funciona únicamente con residuos orgánicos, por lo tanto, es recomendable que el residuo que vaya a ser utilizado sea separado de manera anticipada, evitando su contaminación con otros materiales.

### 6.2.3 Clima y geografía

Aspectos climáticos y geográficos del sitio podrán favorecer o desfavorecer un digestor. La región del sur de México cuenta una amplia gama de variaciones climatológicas. De manera general es posible resumir que la precipitación acumulada anual varía entre los 500 mm hasta los 4,000 mm, la temperatura máxima promedio entre los 22 °C a los 38 °C, la temperatura mínima promedio entre 7 °C a 25 °C y los días con temperaturas menores a 0 °C tienden a cero (Servicio Meteorológico Nacional, 2010). Considerando estas características de temperatura y precipitación, se clasifica esta región principalmente en las siguientes zonas climáticas: tropicales con lluvias todo el verano, templados con lluvias en el verano y tropicales con lluvia todo el año (CONEVyT, s/f). Estos climas presentan similitudes, sin embargo, se deben reconocer sus diferencias especialmente en la temperatura a nivel local para considerar los diferentes tipos de biodigestores.

#### - Temperatura:

¿Cuál es el rango de temperaturas en la localidad durante el año?

El proceso de digestión anaerobia funciona con diferentes temperaturas según el tipo de reactor. La región del Sur podrá no tener climas tan fríos, pero variaciones en altitud afectan directamente los cambios de temperatura en una cierta ubicación. La laguna anaerobia y los digestores por lotes son tecnologías pueden operar en temperaturas menores a los digestores de mezcla completa y de flujo pistón. En caso que una zona tenga temporada de bajas temperaturas, se podría utilizar alguna de las últimas dos tecnologías pero requerirá de una fuente de calor. En muchas ocasiones se utiliza parte del biogás generado para calentar (Frear, 2013). Esto podría aumentar la complejidad del sistema, algo que no se recomienda en este tipo de proyectos.

Para reconocer el rango de temperatura de una localidad, basta con ubicar la temperatura más baja y la temperatura más alta durante un año.

- Cercanía a fuente de agua:

¿Cuál sería la distancia del digestor a la fuente de agua más cercana?

Intentando evitar algún riesgo al medio ambiente, se establecen distancias recomendadas entre alguna fuente de agua y la instalación del digestor. Varnero (2011) establece que por precaución, un reactor debe estar idealmente en un mínimo de 10 a 15 metros de distancia de algún río, cascada, pozo, lago, etc.

- Acceso a agua:

¿Cuenta con suficiente agua para el funcionamiento del digestor?

Todos los digestores requerirán de agua para mezclar con los residuos. Dependerá del tipo de digestor la cantidad de agua requerida. En el caso de estiércol, considerando que la cantidad de residuo mínimo para operar es de 20 kg, un digestor de flujo pistón requiere de 60 litros de agua diariamente (Martí, 2008).

Para el resto de los tipos de biomasa y su requerimiento mínimo de agua, se calcula un aproximado del requerimiento mínimo de agua diario (ver Anexo D). Al hablar de un sustituto, se refiere al líquido residual del digestor o bien líquidos de otros procesos, como por ejemplo, el suero de las productoras de leche.

## 6.2.4 Operación

- Transporte:

¿Existe un medio de transporte desde el punto de generación de los residuos hacia el digestor?

Una menor distancia entre la fuente de generación y dónde se procesarán los residuos, brindará mayor rapidez en los procesos, requerirá de menor tiempo hora-hombre y con menores gastos relacionados al transporte.

- Personal:

¿Ha considerado personal para la operación y mantenimiento del digestor?

Según el diseño y tamaño del digestor se requerirá de personal adecuado para su operación. Al tratarse de un digestor continuo se deberá tener una disponibilidad diaria, mientras que un digestor discontinuo requerirá personal cada vez que haya carga y descarga, lo que podría ser hasta meses. Así mismo, un correcto manejo del digestor evitará riesgos de salud en los operadores, evitará contaminación al ambiente y en general hará su uso más seguro.

La matriz hace referencia a la consideración de personal para implementar un proyecto de este tipo.

- Uso de biofertilizante:

¿Se utilizará el biofertilizante generado en el proceso?

Otro producto, además del biogás, es el biofertilizante, excepto en los digestores tipo laguna anaerobia cubierta. El biofertilizante son sólidos ya procesados que podrán ser utilizados en cultivos y fungir como un medio natural de nutrición para el suelo. En caso de que no vaya ser aprovechado de ésta manera se debe planear su manejo adecuado, incluyendo almacenamiento, transporte y disposición final, según aplique.

- Uso de biogás:

¿Es posible utilizar el biogás?

Los digestores que son cargados diariamente, tal como el de mezcla completa, flujo pistón y la laguna anaerobia, generan biogás de manera continua. Sin embargo los digestores por lotes, tendrán “picos de generación”. En caso de utilizar este último, se recomienda verificar el diseño para incluir múltiples secciones conectados a la misma tubería de gas para lograr que las cargas y descargas sean planeadas y generen biogás de manera más constante.

- Espacio de instalación:

¿Cuál es el tamaño del terreno disponible para el digestor?

Los digestores requerirán de diferente espacio según su tipo, el volumen de biomasa, la dilución, el tiempo que los residuos serán procesados, entre otros. Para calcular una referencia del espacio mínimo requerido para instalar este tipo de sistemas toman de referencia datos digestores rurales en otros países de Latinoamérica y digestores industriales en México (ver datos en Anexo E).

- Distancia entre reactor y uso de biogás:

¿Cuál es la distancia del biodigestor y el sitio de consumo?

Varnero (2011) recomienda que la distancia límite para ubicar el biodigestor de la cocina de la familia es 30 metros. Esto debido a que las tuberías son costosas y porque las presiones que se obtienen de un digestor pequeño no permite el desplazamiento del biogás a distancias más largas sin intervención. Además, ubicar el digestor en un punto medio entre el sitio de dónde proviene los residuos y el sitio dónde se utilizará el biogás brindará mayores facilidades para el usuario. Por ejemplo, en caso de trabajar con la biomasa de estiércol vacuno y que el biogás será utilizado para cocinar, el digestor se deberá ubicar entre la cocina y los establos (Martí, 2008).

**Tabla 11.** Matriz de decisión para la correcta selección del proceso de digestión anaerobia.

| Parámetro  | Tipo de Digestor                      |   |          |                                       |   |          |                                       |   |            |                                       |   |          |
|--|---------------------------------------|---|----------|---------------------------------------|---|----------|---------------------------------------|---|------------|---------------------------------------|---|----------|
|  | Mezcla completa                       |   |          | Flujo Pistón                          |   |          | Laguna anaerobia cubierta             |   |            | Lotes                                 |   |          |
| <u>Parámetro: Generación de residuos</u>                                       |                                       |   |          |                                       |   |          |                                       |   |            |                                       |   |          |
| Cantidad de generación (estiércol)   | N/G*                                  | < 20 kg<br>Considerar codigestión             | ≥ 20 kg  | N/G*                                  | < 20 kg<br>Considerar codigestión             | ≥ 20 kg  | N/G*                                  |   |            | N/G*                                  | < 20 kg<br>Considerar codigestión             | ≥ 20 kg  |
| Cantidad de generación (cosechas)  | N/G*                                  | < 4 kg<br>Considerar codigestión              | > 4 kg   | N/G*                                  | < 4 kg<br>Considerar codigestión              | > 4 kg   | N/G*                                  | < 500 kg                                      | ≥ 500 kg   | N/G*                                  | < 4 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 4 kg   |
| Cantidad de generación (residuos de cosechas)                                  | N/G*                                  | < 3 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 3 kg   | N/G*                                  | < 3 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 3 kg   | N/G*                                  | < 740 kg                                      | ≥ 740 kg   | N/G*                                  | < 3 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 3 kg   |
| Cantidad de generación (fracción orgánica de los residuos sólidos municipales) | N/G*                                  | < 5 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 5 kg   | N/G*                                  | < 5 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 5 kg   | N/G*                                  | < 1,460 kg                                    | ≥ 1,460 kg | N/G*                                  | < 5 kg<br>Considerar codigestión              | ≥ 5 kg   |
| Temporalidad (frecuencia de generación)  | Discontinua                           |   | Continua | Discontinua                           |   | Continua | Discontinua                           |   | Continua   | Discontinua                           |   | Continua |
| <u>Parámetro: Gestión de residuos</u>  |                                       |   |          |                                       |   |          |                                       |   |            |                                       |   |          |
| Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS)                                    | No<br>Considerar implementar una GIRS | No, hay separación de orgánicos e inorgánicos | Sí       | No<br>Considerar implementar una GIRS | No, hay separación de orgánicos e inorgánicos | Sí       | No<br>Considerar implementar una GIRS | No, hay separación de orgánicos e inorgánicos | Sí         | No<br>Considerar implementar una GIRS | No, hay separación de orgánicos e inorgánicos | Sí       |
| Riesgo de Contaminación  | Sí<br>Con residuos peligrosos         | Sí<br>Con residuos inorgánicos                | No       | Sí<br>Con residuos peligrosos         | Sí<br>Con residuos inorgánicos                | No       | Sí<br>Con residuos peligrosos         | Sí<br>Con residuos inorgánicos                | No         | Sí<br>Con residuos peligrosos         | Sí<br>Con residuos inorgánicos                | No       |

| Parámetro: Clima y Geografía                                      |   |  |  |  |   |  |             |  |  |  |             |  |   |  |  |  |              |  |                                     |  |                                    |  |            |  |
|---|---|--|--|--|---|--|-------------|--|--|--|-------------|--|---|--|--|--|--------------|--|-------------------------------------|--|------------------------------------|--|------------|--|
| Temperatura   | 5°C a 30°C<br>Considerar sistema de calentamiento |  | 13°C a 38°C                                    |  | 5°C a 30°C<br>Considerar sistema de calentamiento |  | 13°C a 38°C |  | 5°C a 30°C                                     |  | 13°C a 38°C |  | 5°C - 30°C<br>Considerar sistema de calentamiento |  | 13°C - 38°C                                    |  |              |  |                                     |  |                                    |  |            |  |
| Cercanía a una fuente de agua                                     | 0 m - 5 m   |  | 5 m - 10m<br>Precaución adicional en operación |  | ≥ 10 m  |  | 0 m - 5 m   |  | 5 m - 10m<br>Precaución adicional en operación |  | ≥ 10 m      |  | 0 m - 5 m   |  | 5 m - 10m<br>Precaución adicional en operación |  | ≥ 10 m       |  |                                     |  |                                    |  |            |  |
| Acceso a agua (estiércol)   | N/G*  |  | < 200 litros<br>Considerar sustituto           |  | ≥ 200 litros                                      |  | N/G*        |  | < 60 litros<br>Considerar sustituto            |  | ≥ 60 litros |  | N/G*  |  | N/G*   |  | N/G*         |  | < 20 litros<br>Considerar sustituto |  | ≥ 20 litros                        |  |            |  |
| Acceso a agua (cosechas)  | N/G*  |  | < 120 litros<br>Considerar sustituto           |  | ≥ 120 litros                                      |  | N/G*        |  | < 36 litros<br>Considerar sustituto            |  | ≥ 36 litros |  | N/G*  |  | < 700 litros<br>Considerar sustituto           |  | ≥ 700 litros |  | N/G*                                |  | < 9 litros<br>Considerar sustituto |  | ≥ 9 litros |  |
| Acceso a agua (residuos de cosechas)                              | N/G*  |  | < 60 litros<br>Considerar sustituto            |  | ≥ 60 litros                                       |  | N/G*        |  | < 18 litros<br>Considerar sustituto            |  | ≥ 18 litros |  | N/G*  |  | < 360 litros<br>Considerar sustituto           |  | ≥ 360 litros |  | N/G*                                |  | < 5 litros<br>Considerar sustituto |  | ≥ 5 litros |  |
| Acceso a agua (fracción orgánica de residuos sólidos municipales) | N/G*  |  | < 50 litros<br>Considerar sustituto            |  | ≥ 50 litros                                       |  | N/G*        |  | < 15 litros<br>Considerar sustituto            |  | ≥ 15 litros |  | N/G*  |  | < 300 litros<br>Considerar sustituto           |  | ≥ 300 litros |  | N/G*                                |  | < 4 litros<br>Considerar sustituto |  | ≥ 4 litros |  |
| Parámetro de: Operación y mantenimiento                           |   |  |  |  |   |  |             |  |  |  |             |  |   |  |  |  |              |  |                                     |  |                                    |  |            |  |
| Transporte  | No<br>Reconsiderar ubicación de digestor          |  | Sí   |  | No<br>Reconsiderar ubicación de digestor          |  | Sí          |  | No<br>Reconsiderar ubicación de digestor       |  | Sí          |  | No<br>Reconsiderar ubicación de digestor          |  | Sí   |  |              |  |                                     |  |                                    |  |            |  |
| Personal  | No<br>Examinar necesidad de personal              |  | Sí   |  | No<br>Examinar necesidad de personal              |  | Sí          |  | No<br>Examinar necesidad de personal           |  | Sí          |  | No<br>Examinar necesidad de personal              |  | Sí   |  |              |  |                                     |  |                                    |  |            |  |

|                                |   |   |                                  |   |   |                                  |                       |                                    |                                  |   |                                    |   |                       |
|--------------------------------|---|---|----------------------------------|---|---|----------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------------|---|-----------------------|
| Uso de biofertilizante         | No<br>Considerar<br>disposición final                         | Sí  |                                  | No<br>Considerar<br>disposición final                         | Sí  |                                  | N/A                   |                                    |                                  | No<br>Considerar<br>disposición final   | Sí                                 |   |                       |
| Uso de biogás                  | Sí  |   |                                  | Sí  |   |                                  | Sí                    |                                    |                                  | Sí<br>Verificar el diseño para asegurar la generación<br>continua de biogás (ver Anexo F) |                                    |   |                       |
| Espacio de instalación         | $\leq 10 \text{ m}^2$<br>Revisar<br>cantidad de<br>generación | $10 \text{ m}^2$<br>–<br>$20 \text{ m}^2$ | $\geq 20 \text{ m}^2$            | $\leq 10 \text{ m}^2$<br>Revisar<br>cantidad de<br>generación | $10 \text{ m}^2$<br>–<br>$20 \text{ m}^2$ | $\geq 20 \text{ m}^2$            | $\leq 50 \text{ m}^2$ |                                    | $\geq 50 \text{ m}^2$            |   | $\leq 10 \text{ m}^2$              | $10 \text{ m}^2$<br>–<br>$20 \text{ m}^2$ | $\geq 20 \text{ m}^2$ |
| Distancia entre digester y uso | $\geq 30 \text{ m}$   | $15 \text{ m} -$<br>$30 \text{ m}$        | $0 \text{ m} - 15$<br>$\text{m}$ | $\geq 30 \text{ m}$   | $15 \text{ m} -$<br>$30 \text{ m}$        | $0 \text{ m} - 15$<br>$\text{m}$ | $\geq 30 \text{ m}$   | $15 \text{ m} -$<br>$30 \text{ m}$ | $0 \text{ m} - 15$<br>$\text{m}$ | $\geq 30 \text{ m}$   | $15 \text{ m} -$<br>$30 \text{ m}$ | $0 \text{ m} - 15$<br>$\text{m}$          |                       |

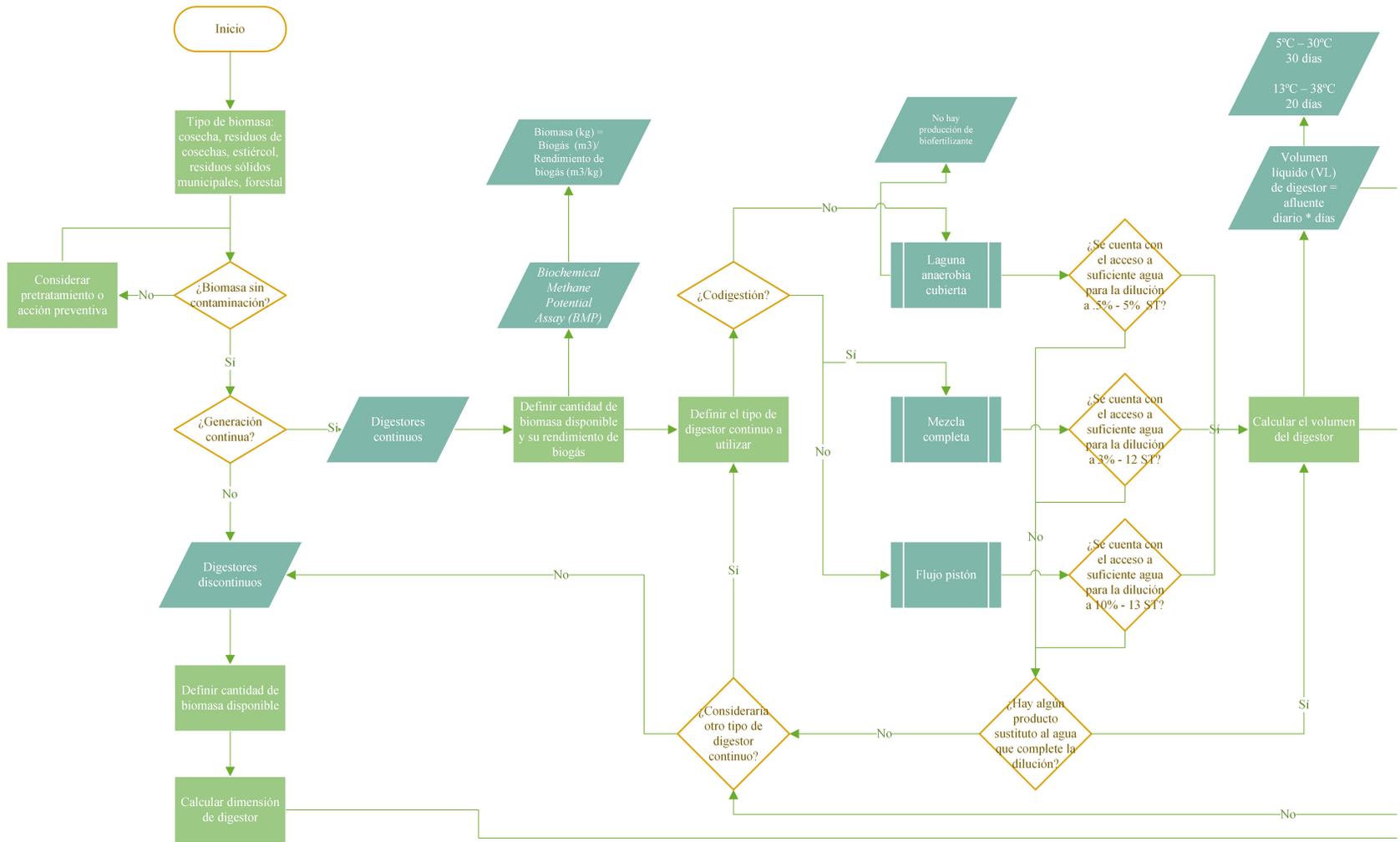
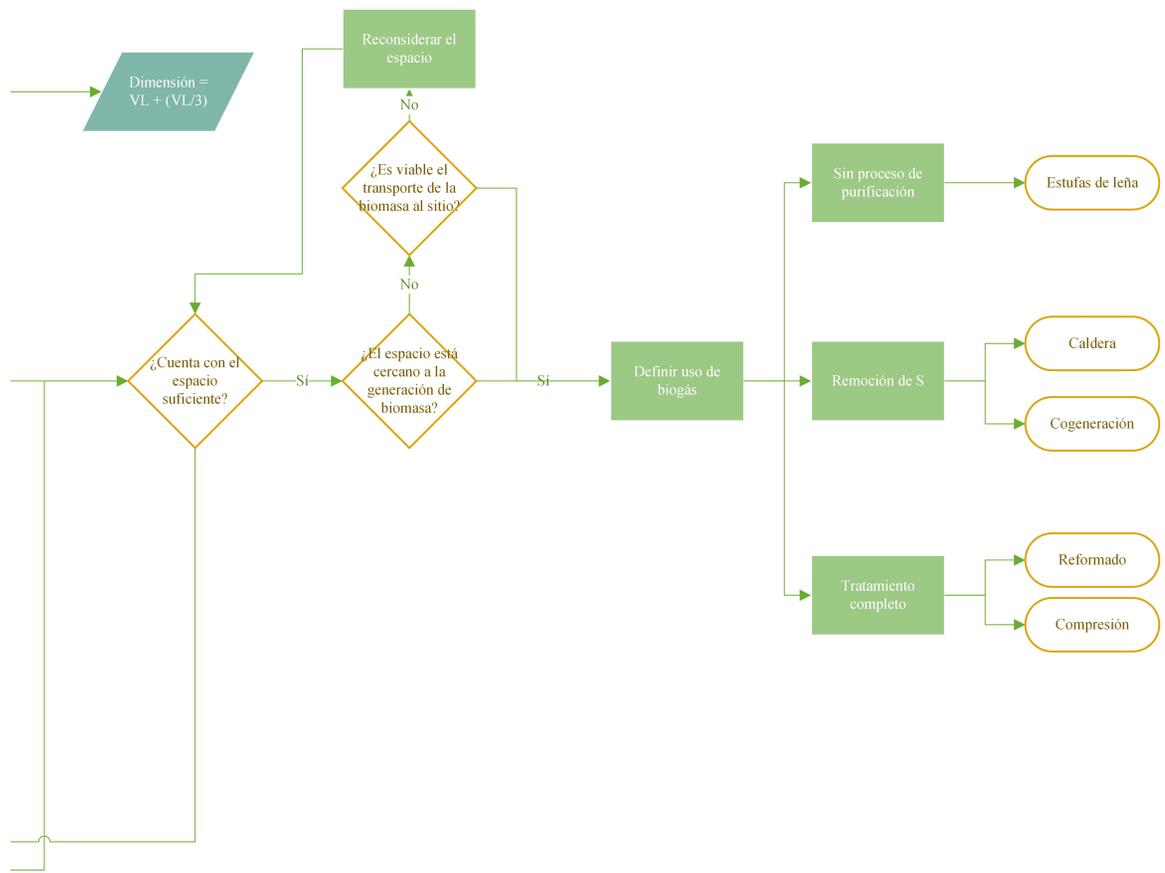


Figura 30. Diagrama de flujo para planeación y diseño de un digester



### 6.3 Matriz Técnica

La matriz técnica (Tabla 13) incluye a mayor detalle parámetros de diseño y operación de un digestor. La intención es que sea un complemento para el consultor, ingeniero y/o técnico que define, planea e instala el sistema. Primero se incluyen parámetros que varían según el tipo de digestor y posterior a ellos son consideraciones generales que aplican de manera similar para todos.

- Temperatura: de los cuatro tipos de digestores, la laguna anaerobia es la única con operación a temperatura psicrófila. El digestor por lotes, flujo pistón, y de mezcla completa pueden operar con temperaturas mesofílicas y termofílicas. Como en cualquier otro proceso biológico, las temperaturas más altas significan un aumento en la velocidad de los procesos. El clima de la zona del Sur de México tiene un panorama beneficioso para el proceso de digestión anaerobia. Las temperaturas mínimas registradas no bajan de 5°C mientras que las más altas llegan hasta 38°C. Aún cuando la generalidad climatológica sea favorable, se debe verificar la frecuencia y duración de las temperaturas más frías a nivel local. Variables como la continentalidad, altitud, topografía, etc., afectan el microclima de un sitio. Para evitar problemas en la operación, es mejor prever posibles complicaciones y su manera de resolverlas desde el diseño del sistema. Por ejemplo, identificar si existe la necesidad de un sistema de calentamiento, necesidad de excavaciones para mejor control de temperatura y consideraciones en el tiempo de retención hidráulica. La Tabla 12 muestra ejemplos de variaciones en TRH según el tipo de clima.

**Tabla 12.** Variación en el TRH según el clima (Adaptada de Varnero, 2011)

| <b>Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)</b> | <b>Características</b>                      | <b>Ejemplos</b>                       |
|---|---|---------------------------------------|
| 30 - 40 días                                | Clima tropical con regiones planas          | Indonesia, Venezuela, América Central |
| 40 - 60 días                                | Regiones cálidas con inviernos fríos cortos | India, Filipinas, Etiopía             |

Contenido de sólidos totales: los digestores continuos operan con biomasa con un contenido no mayor de 12% de sólidos totales, mientras que los digestores discontinuos o por lotes pueden manejar biomasa hasta con 40% de sólidos totales. Generalmente, digestores en el medio rural trabajan con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor (Varnero, 2011). Para reconocer la cantidad de líquido requerido, primeramente se tendrá que analizar el sustrato en laboratorio. Una vez que se tengan sus características fisicoquímicas, será posible calcular con una mayor certidumbre las variables de operación. Por medio de la siguiente ecuación es posible calcular la cantidad requerida por cada kg de biomasa:

$$\% \text{ de sólidos totales deseados} = \frac{\% \text{ de sólidos totales actuales en un kg de biomasa}}{1 \text{ kg de biomasa en forma original} + \text{cantidad de agua}}$$

o bien,

$$\text{Litros de agua} = \frac{\% \text{ de sólidos totales actuales}}{\% \text{ de sólidos totales deseados}}$$

El líquido usualmente es agua, de preferencia la pluvial o gris por cuestiones de costos y conveniencia. Aunque el líquido adicionado al sustrato no necesariamente debe ser agua. Existen casos en el que se utilizan los lixiviados o el suero de la leche para reducir el consumo de agua potable y/o tener menor dependencia a insumos externos al sistema.

- Tiempo: un TRH adecuado cuidará la calidad y estabilidad del bioabono, así como la generación continua y las cantidades esperadas de biogás. Con el digestor flujo pistón se podrá controlar de mejor manera el tiempo que en un reactor de mezcla completa o que la laguna anaerobia cubierta.

- Codigestión: cada biomasa tendrá diferente potencial de generación de biogás. Un tipo de biomasa con menor valor energético, como es el caso del estiércol, requerirá de un mayor volumen para generar la misma cantidad de biogás que un tipo de biomasa con alto valor energético. La codigestión, una mezcla de diferentes tipos de biomasa, es un medio para aumentar el valor energético del sustrato. En caso de que se mezclaran dos tipos de biombras para debe asegurarse la homogeneidad del producto.
- Materiales de construcción: utilizar materiales regionales minimiza los impactos ambientales durante la construcción del proyecto, debido a menores emisiones causadas por su transporte. Por el mismo motivo, podrá brindar ahorros económicos. Sin embargo, no se deben de descuidar los materiales adecuados según el tipo de digestor.

Las consideraciones generales son las siguientes:

- Volumen: Martí (2008) expresa que para definir el tamaño aproximado del digestor se debe reconocer el volumen líquido. Esto porque existe la relación una relación 3:1 entre el volumen líquido y gaseoso. Para calcular el volumen estimado es posible utilizar la fórmula siguiente:

$$V_T = V_L + (V_G)$$

$$V_T = V_L + (V_L/3)$$

$$V_T = \text{volumen total}$$

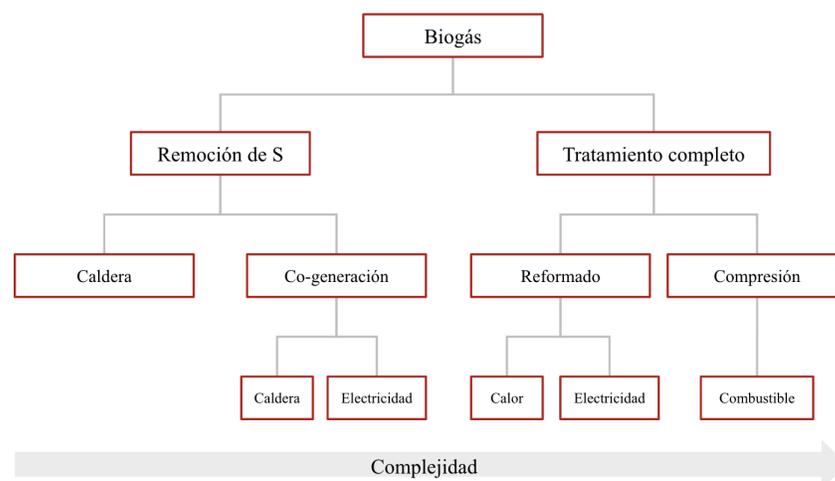
$$V_L = \text{volumen líquido}$$

$$V_G = \text{volumen gaseoso}$$

- Biomasa con patógenos u organismos infecciosos: lo más recomendable es el pretratamiento por medio de la higienización, esterilización o pasteurización, según el nivel de contaminación. La esterilización requiere de al menos 20 minutos, más de 133°C y una presión mínima de 3 bares. La pasteurización es

usualmente necesaria con los productos animales. Esta requiere de al menos 60 minutos en un rango de temperaturas de 70°C a 90°C (Begum, 2014).

- Biomasa con materiales no biodegradables: la idealidad es que la biomasa sea separada de materiales no biodegradables desde la generación. Sin embargo, según la situación, la biomasa puede pasar por un proceso de pretratamiento para separar estos materiales no deseados. Algunos ejemplo de ellos son: separadores magnéticos, desarenador y equipos para el cribado.
- Uso de biogás: la manera de utilizar el biogás con menos infraestructura es aprovechándolo directamente en calor para cocinar y/o calentar agua, la siguiente será para su conversión a electricidad y/o calor mientras que lo último será utilizarlo como sustituto de gas natural en la infraestructura ya existente. Este orden en particular varía según la calidad del biogás. La Figura 29 muestra las alternativas en orden de complejidad técnica y económica.



**Figura 29.** Alternativas del uso de biogás (Adaptada de Varnero, 2011)

Nueva tecnología poco a poco irá habilitando los usos de mayor complejidad. Así como los motores generadores de pequeñas dimensiones que pueden proveer de electricidad a las familias en localidades rurales (Martí, 2008).

- Sistema de calentamiento: en caso de que el proyecto requiera de un sistema de calefacción, se requerirá de energía adicional. Este consumo podrá ser mediante el abastecimiento tradicional de la red eléctrica o gas natural. Pero, si la generación de biogás es vasta, se podrá considerar para utilizar como fuente de energía para la calefacción.
- Uso de biofertilizante: al utilizar el abono en temporada de baja absorción (otoño-invierno) podrá causar que lixiviados alcancen alguna fuente de agua (Varnero, 2011). Depende de la profundidad en la que se encuentren dichas fuentes. Una manera de prevenir el riesgo ambiental es almacenando el abono y utilizarlo en temporada de alta absorción (primavera-verano).
- Seguridad: aún cuando no se trabaje con alta presión, el contenedor de gas deberá incluir una válvula de seguridad (Varnero, 2011). También, se debe cuidar que el reservorio de biogás no esté cerca del fuego, que esté protegido del sol en un almacén o en el exterior pero protegido de vientos y procurar que la zona del digestor no permita el paso a animales para evitar que se dañe, cuidar del vandalismo o que niños jueguen cerca (Martí, 2008).
- Tuberías: entre mayor sea la distancia del punto de generación de biogás con el punto de consumo afectará mayor será el costo en la tubería. La planificación de abastecimiento será esencial para reducir gastos adicionales. Puede suceder el caso en el que varios digestores abasteciendo por zonas sea más viable económicamente que uno solo surtiendo la totalidad.

**Tabla 13.** Matriz técnica

| Parámetro                                      | Tipos de digestores   |                             |  |  |
|--|---|-----------------------------|--|--|
|  | Mezcla completa   | Flujo pistón                | Laguna anaerobia cubierta                | Lotes  |
| Temperatura                                    | Mesofílica*<br>Termofílica*   | Mesofílica*<br>Termofílica* | Psicrófílica*                            | Mesofílica*<br>Termofílica*                      |
| % de ST*                                       | 3% - 10%  | 10% - 13%                   | 0.5% - 5%                                | 40% - 60%  |
| Dilución                                       | $\% \text{ de sólidos totales deseados} = \frac{\% \text{ de sólidos totales actuales en un kg de biomasa}}{1 \text{ kg de biomasa en forma original} + \text{cantidad de agua}}$   |                             |  |  |
| TRH*   | 15 - 40 días  | 15 - 40 días                | 40 - 60 días                             | 90 días  |
| Codigestión*                                   | Sí  | No óptimo                   | No óptimo                                | Sí   |
| Materiales de construcción                     | Base: acero, ladrillos, cemento, fibra de vidrio<br>Cubierta (flexible): plástico, caucho   |                             | Cubierta (flexible):<br>plástico, caucho | Base: acero, ladrillos, cemento, fibra de vidrio |
| Tipo de cubierta                               | Fija<br>Flexible  | Fija<br>Flexible            | Flexible                                 | N/A  |
| Control de temperatura (excavación)            | Enterrado<br>Semienterrado  | Enterrado<br>Semienterrado  | Enterrado<br>Semienterrado               | Sobre el suelo<br>Semienterrado                  |
| <u>Consideraciones generales</u>               |   |                             |  |  |
| Volumen de reactor                             | $V_T = V_L + (V_G)$ $V_T = V_L + (V_L/3)$ $V_T = \text{volumen total}$ $V_L = \text{volumen líquido}$ $V_G = \text{volumen gaseoso}$  |                             |  |  |
| Biomasa con patógenos u organismos infecciosos | Pretratamiento: higienización, esterilización o pasteurización.   |                             |  |  |
| Biomasa con materiales no biodegradables       | Pretratamiento: Separación, clasificación, homogenización   |                             |  |  |
| Requerimiento de biomasa                       | $\text{Generación de biomasa (kg)} = \text{Biogás(m}^3) \div \frac{\text{Rendimiento de biogás promedio (m}^3/\text{ton)}}{1,000 \text{ (ton)}}$  |                             |  |  |
| Uso de biogás                                  | Complejidad en aumento: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calor sin remoción de ácido sulfhídrico</li> <li>2. Calor con remoción de ácido sulfhídrico</li> <li>3. Cogeneración con remoción de ácido sulfhídrico</li> <li>4. Cogeneración con tratamiento completo</li> <li>5. Combustible con tratamiento completo y comprimido</li> </ol> |                             |  |  |
| Sistema de calentamiento                       | Considerar el uso de biogás, antes del uso de gas natural o electricidad.   |                             |  |  |

|                        |   |     |   |
|------------------------|---|-----|---|
| Uso de biofertilizante | Almacenar para uso en temporada de alta absorción   | N/A | Almacenar para uso en temporada de alta absorción |
| Seguridad              | Asegurarse de incluir una válvula de seguridad. Cuidar que el reservorio de biogás no esté cerca de fuego, y que esté protegido del sol en un almacén o en el exterior pero protegido de vientos. Cuidar que la zona esté protegida de vandalismo, niños jugando y/o el paso de animales. |     |   |
| Tuberías               | Reducir distancia entre digestor y sitio de uso de biogás.  |     |   |

\*Definiciones en Sección 5.1.3

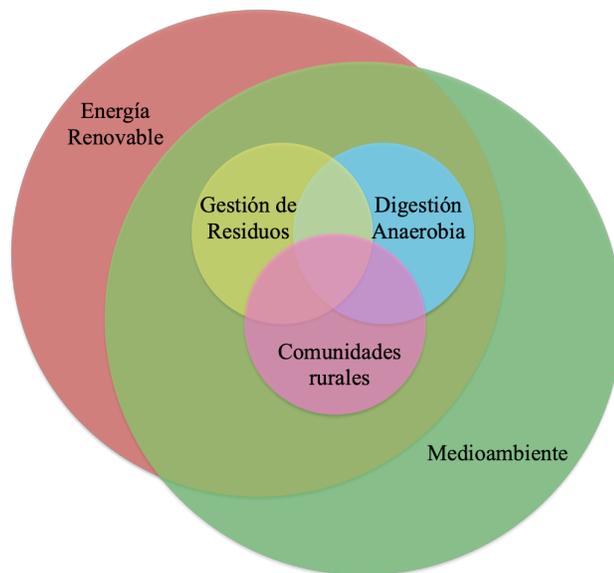
Complementando la matriz técnica, se incluye un diagrama de flujo con el orden y lógica detrás de todas las cuestiones esenciales al diseñar un digestor anaerobio. Este diagrama se muestra en la Figura 30. y es complementado con información necesaria, como fórmulas o referencias que auxilian el proceso de diseño.

## 7. Conclusiones

El proceso de digestión anaerobia presenta un gran potencial para el tratamiento de residuos orgánicos en el Sur de México. Sus productos, el biogás y el digestato, pueden ser valorizados como fuente de energía renovable y biofertilizante, respectivamente. Los beneficios de esta tecnología no sólo son aprovechables en zonas conurbadas sino que presenta una oportunidad importante de desarrollo para localidades rurales en los Estados de Guerrero, Chiapas y Oaxaca.

Las localidades rurales son espacios que por tamaño y ubicación remota usualmente carecen de estudio y suficiente infraestructura. Por ejemplo, sus datos de generación de residuos sólidos no se han contabilizado anteriormente. Así como también, son las zonas donde el manejo de residuos no es el más óptimo.

Por ello, se trabajó en el presente proyecto abarcando cinco esferas (Figura 31). El panorama más amplio incluye la energía renovable y el medio ambiente. El espacio donde convergen se encuentra la gestión de residuos, la digestión anaerobia, y las comunidades rurales. Esto demuestra que mediante el uso del proceso de digestión anaerobia se busca la gestión adecuada de residuos orgánicos mientras que simultáneamente se aprovecha su producto, el biogás, como fuente de energía renovable en localidades rurales.



**Figura 31.** Diagrama de temas desarrollados

La elección de localidades rurales en la región del Sur sucede de un profundo análisis de información. Estudiando las siete regiones de los Estados Unidos Mexicanos, así como sus incidencias en materia de Índice de Desarrollo Humano, pobreza, cantidad de habitantes de localidades rurales y la carencia de energía en viviendas, facilitó la visualización de una mayor área de oportunidad en esa región.

Posterior a reconocer la zona de estudio, la investigación del proceso de digestión anaerobia consistió en entender sus parámetros de operación, los tipos de digestores, los productos que se pueden obtener, sus posibles usos y sus beneficios ambientales. Esta información fue la base para generar posteriormente la herramienta de selección.

La herramienta de selección se trabajó en tres secciones. Las primera dos, los mapas y la matriz de decisión para la correcta selección del proceso de digestión anaerobia, son dirigidas a tomadores de decisión de municipalidades en Chiapas, Guerrero y Oaxaca. Sus funciones son ubicar geográficamente las áreas de oportunidad para el aprovechamiento de biomasa y para tener una guía de referencia de los requerimientos para llevar a cabo un proyecto con esta tecnología. Una vez que se decide llevar a cabo el proyecto, la tercera parte, la matriz técnica, entra como soporte a ingenieros, consultores y/o técnicos presentes en el proceso de diseño.

Los mapas fueron elaborados con el programa de Mapa Digital de INEGI, datos del Censo de Población y Vivienda 2010 y el Censo Agrícola, Ganadero y Forestal del 2007. La información disponible permitió generar guías visuales para ubicar la generación de los siguientes residuos: fracción orgánica de residuos sólidos, estiércol bovino, estiércol porcino, estiércol ovino, estiércol de aves de corral y cosechas. Estos datos servirán como referencia pero deben considerarse su actualización e incertidumbre.

La matriz de decisión para la correcta selección del proceso de digestión anaerobia es una sección de la herramienta que combina la evaluación cuantitativa y cualitativa. La matriz consiste en valorar cuatro diferentes tipo de digestores: mezcla completa, laguna anaerobia cubierta, flujo pistón y por lotes, ante trece parámetros en cuatro categorías diferentes: generación de residuos, gestión de residuos, clima y geografía y operación y mantenimiento. El

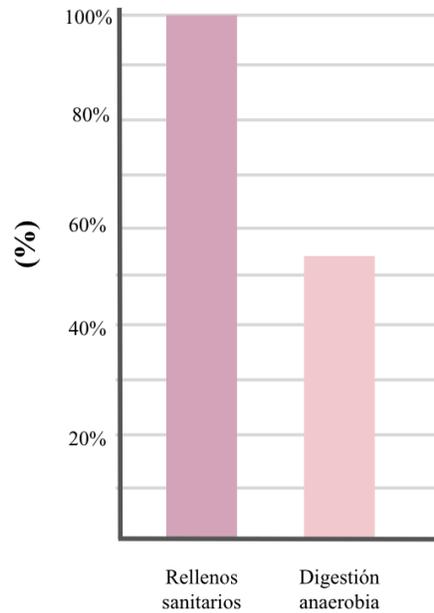
tomador de decisiones marcará la celda correspondiente a su proyecto en cada fila para cada tipo de digestor. Al finalizar, se realiza un conteo de las celdas marcadas y por medio de un código de colores podrá definir cuál es la el proceso más adecuado para su situación.

La tercera sección, la matriz técnica, reúne datos, fórmulas y procesos que se deben considerar en los procesos de diseño de cada uno de los diferentes tipos de digestores. La matriz incluye datos de temperatura, tiempo de retención hidráulica, porcentaje de sólidos totales, materiales de construcción, volumen de reactor, entre otros. Adicionalmente, se crea un diagrama de flujo con todas las consideraciones de diseño para conectar cada una de estas variables y navegar entre las opciones disponibles según las características del proyecto.

La herramienta de selección está regionalizada a los tres Estados del Sur de México: Chiapas, Guerrero y Oaxaca. Se espera que su uso pueda promover y facilitar el uso del proceso de digestión anaerobia como tratamiento biológico de residuos orgánicos. Es un oportunidad para brindar energía renovable a zonas que no cuentan actualmente con infraestructura suficiente y tiene la gran ventaja de que se estará aprovechando residuos ya generados dentro de la comunidad para su conversión en otro producto de autoconsumo.

Además, sustituir la leña, combustible más común para calentar agua, cocinar y calefacción en las viviendas, por biogás, ofrece la oportunidad para reducir los esfuerzos para la búsqueda diaria de este material vegetal junto con las enfermedades respiratoria causadas por la inhalación de humos en la combustión.

Aunque sin dejar atrás los beneficios ambientales de este tratamiento biológico sobre otros procesos. Por ejemplo, se comparó el tratamiento de residuos orgánicos por medio de la digestión anaerobia y la disposición final en rellenos sanitarios en el programa SimaPro. Los resultados en el impacto sobre el calentamiento global se muestran en la Figura 32. Los datos confirman que el impacto del proceso de digestión anaerobia sobre el cambio climático es 45% menor que el impacto de la disposición en rellenos sanitarios.



**Figura 32.** Potencial de calentamiento global entre la disposición en relleno sanitarios y el tratamiento mediante digestión anaerobia (Software Simapro)

Todas las ventajas del proceso de digestión anaerobia deberán ser comunicadas adecuadamente a los actores claves en el momento de implementación de un proyecto. Una comunidad que se apropie de la tecnología tendrá mayor oportunidad de desarrollar el proyecto con éxito y de la manera más provechosa posible.

Por último, es importante remarcar que las limitantes temporales del presente proyecto no permitieron elaborar una herramienta para todas las regiones de México ni para todas las variables de tipos de digestores. Sin embargo, se considera que la modificación de algunos parámetros habilitará la funcionalidad de la matriz de decisión funcionalidad a localidades rurales de otras zonas del país. El proceso de digestión anaerobia es complejo, cada día nuevo conocimiento es agregado al área. Por lo que se considera que la herramienta debe ser actualizada para mantener su utilidad y ampliada en cuanto a parámetros y tipos de digestores para aumentar los beneficios ambientales y sociales que ofrece la tecnología.

## **Glosario**

Biogás: producto del proceso de digestión anaerobia que está compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano.

Localidad rural: zona con una población que cuenta con menos de 2500 habitantes (Cervera & Rangel, 2015)

Localidad urbana: zona con donde existe un agrupamiento de construcciones permanentes con una población de más de 2,500 habitantes (Cervera & Rangel, 2015).

Patógeno: microorganismo que origina y desarrolla una enfermedad

Pobreza: estado en el que una persona tiene al menos una carencia social. Los seis indicadores son educación, seguridad social, vivienda, servicios básicos de la vivienda, salud y alimentación (CONEVAL, s/f)

Reciclaje: Transformación de los materiales en los residuos sólidos por medio de distintos procesos que permitan la revalorización de estos

Residuos sólidos: Todos los materiales sólidos o semisólidos que el poseedor no considera de suficiente valor como para ser retenidos (Tchobanoglous *et al.*, 1997)

Residuos orgánicos: Variedad de residuos que tienen el potencial de ser reciclados de vuelta al sistema natural por la acción de microorganismos (Polprasert & Koottatep, 2017)

## Bibliografía

Araiza, J., Nájera, H., Gutiérrez, R. & Rojas, M. (2018) Emplacement of solid waste management infrastructure for the Frailesca Region, Chiapas, México, using GIS tools. Recuperado el 29 de septiembre 2019 de: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.01.004>

Begum, L. (2014) *Advanced Processes and Technologies for Enhanced Anaerobic Digestion*. Toronto: A Green Nook Press Publication

Canter, L. (2000) *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental: Técnicas para la elaboración de estudios de impacto*. España: Madrid: McGraw Hill

California Air Resources Board (2012) Biogas Yield Estimates. Recuperado el 1 de noviembre 2019 de: <https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/2a2b/internal/hsad-rng-062812.pdf>

Caruana, D. J., & Olsen, A. E. (Eds.). (2011). *Anaerobic digestion : Processes, products and applications*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>

Central Intelligence Agency (2019) The World Factbook: Mexico. Recuperado el 21 de septiembre 2019 de: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mx.html>

Cervera, M. & Rangel, W. (2015) Distribución de la Población por Tamaño y su Relación con el Medio Ambiente. INEGI. Recuperado el 12 de agosto 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/eventos/2015/poblacion/doc/p-WalterRangel.pdf>

Chen, L. & Niebling, H. (2014) *Anaerobic Digestion Basics*. University of Idaho. Recuperado el 27 de septiembre 2019 de: <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1215.pdf>

Christensen, T. (Ed.). (2010). *Solid waste technology and management*. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com>

CONEVAL (2018) Evolución de la pobreza y pobreza extrema nacional y en entidades federativas. Recuperado el 25 de septiembre 2019 de: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza-2018.aspx>

CONEVAL (s/f) Glosario. Recuperado el 25 de septiembre 2019 de: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Glosario.aspx>

CONEVyT (2010) Regiones de México. Recuperado el 21 de septiembre 2019 de: [https://www.conevyt.org.mx/colaboracion/colabora/objetivos/libros\\_pdf/sso1\\_u3lecc2.pdf](https://www.conevyt.org.mx/colaboracion/colabora/objetivos/libros_pdf/sso1_u3lecc2.pdf)

CONEVyT (s/f) Clasificación y Distribución de Climas en México. Recuperado el 31 de octubre 2019 de: [http://www.cursosinea.conevyt.org.mx/cursos/cnaturales\\_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant\\_4\\_13.htm](http://www.cursosinea.conevyt.org.mx/cursos/cnaturales_v2/interface/main/recursos/antologia/cnant_4_13.htm)

DOF (2003) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México

DOF(2003) NOM-083-SEMARNAT-2003 Especificaciones de Protección Ambiental para la Selección del Sitio, Diseño, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura y Obras Complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial.

DOF (1985) NMX-AA-61-1985 Protección al Ambiente - Residuos Sólidos Municipales - Determinación de la Generación.

Ellen Macarthur Foundation (2013) The Art of Design for Disassembly. Recuperado el 31 de agosto de 2019: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/news/EMF\\_Engineering-the-Circular-Economy\\_300913.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/news/EMF_Engineering-the-Circular-Economy_300913.pdf)

EPA (2019) How does an anaerobic digester works? Recuperado el 4 de octubre 2019 de: <https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work>

FAO (2014) Crop residues and livestock residues. Recuperado el 4 de octubre 2019 de: <http://www.fao.org/3/a-bp843e.pdf>

Florkowski, W., Us, A. & Klepacka, A. (2018) Food waste in rural households support for local biogas production in Lubelskie Voivodship (Poland). Recuperado el 29 de septiembre 2019 de: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.022>

Frear, C. [eLearningBTC] (2013, agosto 3) An Overview of Anaerobic Digestion. [Archivo de video] Recuperado el 18 de agosto 2019 de: <https://www.youtube.com/watch?v=Tc80FrDCi4E>

Gomes,C., Binti, M. & Jabbar, S. (2016) Aerobic and anaerobic sewage biodegradable processes: the gap analysis. Recuperado el 4 de octubre 2019 de:

[https://www.researchgate.net/publication/320922010\\_Aerobic\\_and\\_Anaerobic\\_Sewage\\_Biodegradable\\_Processes\\_The\\_Gap\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/320922010_Aerobic_and_Anaerobic_Sewage_Biodegradable_Processes_The_Gap_Analysis)

Hamilton, D. (2017) Anaerobic Digestion of Animal Manures: Inhibitory and Toxic Materials. Recuperado el 27 de septiembre de 2019 de: <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-8839/>

Harvey, P., Baghri, S. & Reed, B. (2005) Emergency Sanitation. Capítulo 7. UK: WDEC Publications. Recuperado el 20 de agosto 2019 de: [https://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex\\_files/WEDC/es/es.htm](https://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/watsan2005/annex_files/WEDC/es/es.htm)

Hilburn, A. M. (2015). At home or to the dump? Household garbage management and the trajectories of waste in a rural Mexican Municipio. *Journal of Latin American Geography*, (2), 29. Recuperado el 30 de agosto 2019 de: <http://ezproxy.udem.edu.mx:2072/login.aspx?direct=true&db=edsgii&AN=edsgcl.426542705&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Horta, L., Antonio, L., Barbosa, L. & Lima Verde, M. (2017) Sustainable and integrated bioenergy assessment for Latin America , Caribbean and Africa (SIByl-LACAf ): the path from feasibility to acceptability, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (2017) 292–308, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.163>.

Hussung, T. (2017) 7 Steps for the Decision Making Process. Recuperado el 17 de octubre 2019 de: <https://online.csp.edu/blog/business/decision-making-process>

INECC (s/f) Manejo Integral de los Residuos Sólidos. Recuperado el 28 de agosto de 2019 de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/133/manejo.html>

INEGI (2018) Estadísticas Ambientales: Módulo de Residuos Urbanos. Recuperado el 29 de agosto 2019 de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323492/CTEIERSP\\_Sesio\\_n\\_abril\\_5\\_2018\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323492/CTEIERSP_Sesio_n_abril_5_2018_RESIDUOS_SOLIDOS.pdf)

INEGI (2015) Panorama Sociodemográfico de Chiapas. Recuperado el 17 de noviembre 2019 de: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/inter\\_censal/panorama/702825082154.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/panorama/702825082154.pdf)

INEGI (2015) Panorama Sociodemográfico de Guerrero. Recuperado el 17 de noviembre 2019 de:

[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/inter\\_censal/panorama/702825082208.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/panorama/702825082208.pdf)

INEGI (2015) Panorama Sociodemográfico de Oaxaca. Recuperado el 17 de noviembre 2019 de: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/inter\\_censal/panorama/702825082307.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/panorama/702825082307.pdf)

INEGI (2014) Sistema de Información Geográfica. Recuperado el 25 de octubre 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>

INEGI (2010) Información por entidad. Recuperado el 25 de septiembre 2019 de: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>

INEGI (2010) Vivienda que no disponen de energía eléctrica. Recuperado el 25 de septiembre 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/app/estatal/#grafica>

INEGI (1998) Diccionario de Datos: Topográficos. Recuperado el 19 de septiembre 2019 de: [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222703/702825222703\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222703/702825222703_1.pdf)

INAFRED (s/f) Arteaga. Recuperado el 15 de agosto 2019 de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM05coahuila/municipios/05004a.html>

INEGI (2015) Población total. Recuperado el 14 de agosto 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>

INEGI (2014) Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica. Recuperado el 19 de septiembre 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/app/estatal/#grafica>

Jain, S., Newman, D., Cepeda-Márquez, R. & Zeller, K. (2018) Global Food Waste Management: An Implementation Guide for Cities. World Biogas Association. Recuperado el 8 de septiembre 2019 de: <http://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2018/05/Global-Food-Waste-Management-Full-report-pdf.pdf>

Letcher, T. & Vallero, D. (2011) Waste: A Handbook of Management. Amsterdam, Países Bajos: Academic Press

Li, X., Bi, F., Han, Z., Quin, Y. Wang, H. & Wu, W. (2019) Garbage source classification performance, impact factor, and management strategy in rural areas of China: A case study in Hangzhou. Recuperado el 29 de septiembre 2019 de: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.020>

Martí, J. (2008) Biodigestores Familiares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. GTZ-Energía. Bolivia Recuperado el 29 de octubre 2019 de: [http://redbiolac.org/biblioteca/M\\_BDG\\_GTZ\\_Martiherrero.pdf](http://redbiolac.org/biblioteca/M_BDG_GTZ_Martiherrero.pdf)

Martínez-Amaríz, A. & Garrido-Silva, G. (2019). Uso de la biomasa de residuos orgánicos para el diseño de una estación eléctrica. *Revista UIS Ingenierías*, (1). <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019015>

McDonough, W., & Braungart, M. (2005). *Cradle to cradle (de la cuna a la cuna) : Rediseñando la forma en que hacemos las cosas*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>

Ministerio de Medio Ambiente (2015) Introducción de Biodigestores en Sistemas Agropecuarios en el Ecuador. Recuperado el 2 de noviembre 2019 de: [http://redbiolac.org/wp-content/uploads/2015\\_Manual\\_Biodigestores\\_Ecuador-ilovepdf-compressed-1.pdf](http://redbiolac.org/wp-content/uploads/2015_Manual_Biodigestores_Ecuador-ilovepdf-compressed-1.pdf)

National Resources Leadership Institute (2008) Multi-Criteria Decision Analysis. Recuperado el 20 de octubre 2019 de: <https://projects.ncsu.edu/nrli/decision-making/MCDA.php>

NNFCC (2019) Feedstocks. Recuperado el 1 de noviembre 2019 de: <http://www.biogas-info.co.uk/about/feedstocks/>

Paredes, G., Güerca, L., Molina, L. & Noyola, A. (2015) Methane emissions from stabilization ponds for municipal wastewater treatment in Mexico. Recuperado el 23 de noviembre 2019 de: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2015.1110185>

PNUD (2015) Índice de Desarrollo Humano para la entidades federativas, México. Recuperado el 24 de septiembre 2019 de: <http://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/library/poverty/indice-de-desarrollo-humano-para-las-entidades-federativas--mexi.html>

Polprasert, C., & Koottatep, T. (2017). Organic waste recycling : Technology, management and sustainability. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>

Quispe-Limaylla, A. (2016). Manejo Apropiado De Los Residuos Sólidos Orgánicos Para El Desarrollo Agroalimentario Y Rural. *Agroproductividad*, 9(8), 59–64. Retrieved from <http://ezproxy.udem.edu.mx:2072/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=118231688&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Ríos, M. & Kaltschmidt, M. (2016) Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. Recuperado el 29 de septiembre 2019 de: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.033>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2018) Estadística de Producción Agrícola. Recuperado el 2 de noviembre 2019 de: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>

Servicios Meteorológico Nacional (2010) Mapas de Climatología 1981-2010. Recuperado el 31 de octubre del 2019 de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010>

SEMARNAT (2015) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Recuperado el 14 de agosto 2019 de: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/index.html>

Secretaría de Economía (2018) Información Económica y Estatal: Coahuila. Recuperado el 18 de agosto 2019 de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302688/coahuila\\_2018\\_02.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302688/coahuila_2018_02.pdf)

Stucki, M., Jungbluth, N. & Leuenberger, M. (2011) Life Cycle Assessment of Biogas Production from Different Substrates.

Suárez, J. (2012) Compostaje del subproducto (digestato) que se genera en la digestión metanogénica del alperujo (residuo del olivo). Recuperado el 18 de noviembre 2019 de: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116355/Javiera%20Isabel%20Su%c3%a1rez%20Fuentes.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q. & Ojeda - Benítez, S. (2010) Análisis estadístico de los residuos sólidos domésticos en un municipio fronterizo de México. Recuperado el 29 de septiembre 2019 de: <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323627681002.pdf>

Tangri, N. & Wilson, M. (2017) Waste Gasification & Pyrolysis: High Risk, Low Yield Processes for Waste Management. Recuperado el 18 de noviembre 2019 de: <https://www.noburn.org/wp-content/uploads/Waste-Gasification-and-Pyrolysis-high-risk-low-yield-processes-march-2017.pdf>

Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1997) Gestión Integral de Residuos Sólidos. Madrid: McGraw Hill

Tobón, W. (2013) Análisis multicriterio: Taller para la Información sobre Biodiversidad para la Conservación Medioambiental. Recuperado el 20 de octubre 2019 de: <http://www.recibio.net/wp-content/uploads/2012/11/AnalisisMulticriterio-Wolke.pdf>

University of Southampton (2008) Database of crop species methane production potential. Recuperado el 1 de noviembre 2019 de: <http://www.cropgen.soton.ac.uk/deliverables.htm>

Varnero, M. (2011) Manual de biogás. Recuperado el 24 de septiembre 2019 de: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Velasco, M. (2011) Generation and Disposition of Municipal Solid Waste in Mexico and Potential for Improving Waste Management in Toluca Municipality. Recuperado el 29 de agosto 2019 de: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/velasco\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/velasco_thesis.pdf)

Viesti, G. (2015) Regional Development Scan: Mexico. EuroSocial Program. Recuperado el 21 de septiembre 2019 de: [http://sia.eurosocial-ii.eu/files/docs/1454597808-E-13\\_en.pdf](http://sia.eurosocial-ii.eu/files/docs/1454597808-E-13_en.pdf)

Wellinger, A. (2013). *Biogas handbook : Science, production and applications*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>

Zarate, M., Slotnick, J. & Ramos, M. (2007) Capacity building in rural Guatemala by implementing a solid waste management program. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.016>

## **Anexos**

### **Anexo A - Consideraciones para la herramienta de decisión**

Reconociendo las características del espacio geográfico, la tecnología y sus variables de operación, además de las cinco biomasas a evaluar en este proyecto, se han preseleccionado tipos de digestores para utilizar. Únicamente se trabaja con el digestor de mezcla completa, flujo pistón y laguna anaerobia cubierta. El principal motivo por el que se descartan los reactores de flujo ascendente y el de lecho empacado es debido la complejidad del diseño que genera altos costos en construcción y operación, mantenimiento meticuloso y el uso de biomasa con bajos contenidos sólidos.

## Anexo B - Consumo promedio de biogás de una familia en localidades rurales

Varnero (2011) expresa que el consumo mínimo de una familia de 5 personas viviendo en una localidad rural consiste en 1.5 m<sup>3</sup> de biogás diariamente. La familia promedio en Chiapas, Guerrero y Oaxaca es de 4.2 personas (INEGI, 2015), 3.9 personas (INEGI, 2015) y 3.8 personas (INEGI, 2015), respectivamente, resultando un promedio final de 4 personas por familia. Por lo tanto, el consumo en México será parecido a lo que propone Varnero (2001). A partir de ello, se define el consumo promedio por familia a 1.5 m<sup>3</sup> de biogás diario en la región del Sur de México. Esta cantidad será únicamente para cubrir los requerimientos energéticos de una estufa.

### Anexo C. Rendimiento de biogás por tipo de biomasa

Para definir la generación mínima de biomasa requerida para surtir a una familia promedio en el Sur de México, se toman como referencia los datos de la Tabla 9. Elaborando un promedio del rendimiento de biogás por cada tipo de biomasa se calcula con la siguiente fórmula la generación promedio requerida:

$$\text{Generación mínima requerida (kg)} = 1.5 \text{ (m}^3) \div \frac{\text{Rendimiento de biogás promedio (m}^3/\text{ton)}}{1,000 \text{ (ton)}}$$

Considerando el rendimiento de biogás promedio de las cosechas, 394 m<sup>3</sup>/ton, resulta que la generación mínima de biomasa será de 3.8 kg diarios.

Considerando el rendimiento de biogás promedio de residuos de las cosechas, 488 m<sup>3</sup>/ton, resulta que la generación mínima de biomasa será de 3.1 kg diarios.

Considerando el rendimiento de biogás promedio de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, 300 m<sup>3</sup>/ton, resulta que la generación mínima de biomasa será de 5 kg diarios.

Considerando el rendimiento de biogás promedio de los residuos forestales, 213 m<sup>3</sup>/ton, resulta que la generación mínima de biomasa será de 7 kg diarios.

**Tabla 1.** Rendimiento de biogás promedio

| <b>Biomasa</b>                   | <b>Rendimiento de biogás (m<sup>3</sup>/ton)</b> | <b>Promedio (m<sup>3</sup>/ton)</b> | <b>Fuente</b>                         |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Cosechas</b>                  |  |                                     |                                       |
| Papa                             | 276 - 400  | 338                                 |                                       |
| Trigo                            | 610  | 610                                 |                                       |
| Cebada                           | 353 - 658  | 505                                 |                                       |
| Chícharos                        | 390  | 390                                 | (NNFCC, 2019)                         |
| Remolacha                        | 236 - 381  | 308                                 |                                       |
| Sorgo                            | 295 - 375  | 335                                 |                                       |
| Avena                            | 250 - 295  | 272                                 |                                       |
| Promedio de cosechas             |  | 394                                 |                                       |
| <b>Residuos de cosechas</b>      |  |                                     |                                       |
| Hojas de tomate                  | 603  | 603                                 |                                       |
| Paja de trigo                    | 367  | 367                                 |                                       |
| Paja de arroz                    | 353  | 353                                 | (Ministerio del Medio Ambiente, 2015) |
| Hojas de cebolla                 | 514  | 514                                 |                                       |
| Hojas de papa                    | 606  | 606                                 |                                       |
| Promedio de residuos de cosechas |  | 488                                 |                                       |
| <b>Estiércol</b>                 |  |                                     |                                       |
| Vacuno                           | 15 - 25  | 20                                  | (NNFCC, 2019)                         |

|   |           |     |  |
|---|-----------|-----|--|
| Aves de corral                                    | 30 - 100  | 65  |  |
| Porcino   | 15 - 25   | 25  |  |
| Promedio de estiércol                             |           | 37  |  |
| Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Municipales |           |     |  |
| Residuos alimenticios                             | 300       |     | (California Air Resources Board, 2012) |
| Forestales  |           |     |  |
| Hojas seca  | 417 - 453 | 435 |  |
| Ramas   | 62        | 62  | (California Air Resources Board, 2012) |
| Zacate  | 144       | 144 |  |
| Promedio  |           | 213 |  |

Los datos anteriores serán utilizados de referencia para todos los tipos de digestores a excepción de la laguna anaerobia cubierta. Debido a que no se ha reportado en la literatura diseños tan pequeños como los unifamiliares, se ha considerado únicamente a nivel comunidad. Resultando con un requerimiento de biomasa mucho mayor que los otros tipos de digestores. Para reconocer la cantidad mínima de biomasa en este tipo de digestor se realiza un aproximado basado en la necesidad de espacio de una planta tratadora de aguas residuales en Comitán, México calculado en el Anexo E. El flujo por la generación de aguas residuales en una población escenario de 500 personas es de 1 l/s, equivalente a 86,400 l/día.

Ahora, considerando los datos de la Tabla 1, es posible obtener una referencia de la cantidad de biomasa requerida para una laguna anaerobia cubierta.

**Tabla 1.** Requerimiento de agua por kg de biomasa ( Anexo D)

| <b>Tipo de Biomasa</b>       | <b>Requerimiento de agua por kg de biomasa (litros)</b> |
|------------------------------|---|
| Cosechas                     | 177   |
| Residuos de cosechas         | 117.8   |
| Residuos sólidos municipales | 61.5  |

La forma utilizada es la siguiente:

$$Kg \text{ de biomasa} = \frac{86,400 \text{ litros}}{r}$$

r = requerimiento de litros por kg de biomasa

Utilizando la fórmula anterior, se calcula que para cosechas se requieren de 488 kg, para residuos de cosechas 738 kg y para la fracción orgánica de residuos sólidos municipales 1,416 kg

**Anexo D.** Cálculos para el requerimiento mínimo de agua con diferentes tipos de digestores y sustratos.

Para calcular el requerimiento mínimo de agua en la dilución, se debe de conocer el porcentaje de sólidos totales en el sustrato. Debido a que este dato varía según el caso, se trabaja con un promedio de sólidos totales por tipo de biomasa para poder aterrizar un valor de agua mínimo. Sin embargo, se debe considerar su incertidumbre y es recomendado su estudio posterior por para la planeación e implementación de un proyecto.

La fórmula para reconocer la cantidad de agua requerida según el porcentaje de sólidos totales del sustrato es la siguiente:

$$\% \text{ de sólidos totales deseados} = \frac{\% \text{ de sólidos totales actuales en un kg de biomasa}}{1 \text{ kg de biomasa en forma original} + \text{cantidad de agua}}$$

o bien,

$$\text{Litros de agua} = \frac{\% \text{ de sólidos totales actuales}}{\% \text{ de sólidos totales deseados}}$$

Utilizando la fórmula anterior, el promedio de sólidos totales por tipo de biomasa estimado en la Tabla 1. y el límite mínimo de sólidos totales por tipo de digestor, se calcula la cantidad mínima de agua a la que se debe tener acceso para la dilución. El procesamiento de los datos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Contenido promedio de sólidos totales en diversos sustratos

| <b>Biomasa</b>  | <b>% de sólidos totales</b> | <b>Fuente</b>                     |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Cosechas</b> |                             |                                   |
| Plátano         | 83.8                        | (University of Southampton, 2008) |
| Zanahoria       | 91.3                        |                                   |

|  |             |                 |
|--|-------------|-----------------|
| Maíz   | 97.5        |                 |
| Coliflor   | 84.3        |                 |
| Promedio   | 88.8        |                 |
| <b>Residuos de Cosechas</b>                              |             |                 |
| Rastrojo del maíz  | 77.0        |                 |
| Paja del trigo   | 88.0 - 90.0 |                 |
| Paja de arroz  | 88.8 - 92.6 | (Varnero, 2011) |
| Paja de leguminosas                                      | 60.0 - 80.0 |                 |
| Hojas de tubérculos                                      | 10.0 - 20.0 |                 |
| Hojas de hortalizas                                      | 10.0 - 15.0 |                 |
| Promedio   | 58.9        |                 |
| <b>Estiércol</b>   |             |                 |
| Vacuno   | 13.0 - 20.0 | (Martí, 2008)   |
| Bovino   | 13.4 - 56.2 |                 |
| Aves de corral   | 26.0 - 92.0 | (Varnero, 2011) |
| Porcinos   | 15 - 49.0   |                 |
| Equinos  | 19.0 - 42.9 |                 |
| Promedio   | 34.7        |                 |
| <b>Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Municipales</b> |             |                 |
| Residuos de frutas                                       | 15.0 - 20.0 | (Begum, 2014)   |

|                       |             |                 |
|-----------------------|-------------|-----------------|
| Residuos alimenticios | 10.0        | (Begum, 2014)   |
| Residuos de jardín    | 60.0 - 70.0 |                 |
| Promedio              | 30.8        |                 |
| <b>Forestales</b>     |             |                 |
| Hojas seca            | 50.0        |                 |
| Aserrín               | 74.0 - 80.0 | (Varnero, 2011) |
| Promedio              | 38.5        |                 |

**Tabla 2.** Determinación del requerimiento mínimo de agua (litros/kg de biomasa) para la dilución de diferentes tipos de biomasa y diferentes tipos de digestores.

| Tipo de biomasa y su promedio de % de sólidos totales | Tipo de digester y límite mínimo de % de sólidos totales |              |                           |       |
|---|--|--------------|---------------------------|-------|
|   | Mezcla Completa  | Flujo Pistón | Laguna Anaerobia Cubierta | Lotes |
|   | 3%   | 10%          | 0.5%                      | 40%   |
| <b>Cosechas</b> <b>88.8 %</b>                         | 29.6   | 8.9          | 177.0                     | 2.22  |
| <b>Residuos de cosechas</b> <b>58.9 %</b>             | 19.6   | 5.9          | 117.8                     | 1.5   |
| <b>Estiércol</b> <b>34.7 %</b>                        | 11.6   | 3.5          | 69.4                      | 0.9   |
| <b>Residuos sólidos municipales</b> <b>30.8 %</b>     | 10.2   | 3.1          | 61.5                      | 0.7   |
| <b>Forestal</b> <b>38.5 %</b>                         | 12.8   | 3.9          | 77.0                      | 1.0   |

Una vez calculados los litros diarios requeridos por cada kg de biomasa, se multiplica por la generación mínima establecida en el Anexo 3 para determinar la necesidad de agua en cada uno de los escenarios y utilizar como referencia en la matriz de decisión.

## Anexo E. Requerimiento mínimo de espacio para cada tipo de digestor

La referencia del requerimiento mínimo de espacio se basa en proyectos que incluyen el proceso de digestión anaerobia en localidades rurales en otros países de Latinoamérica. Los datos recuperados se presentan en la Tabla 1. Para el digestor de mezcla completa se utiliza la misma referencia de flujo pistón considerando sus similitudes en sus parámetros de operación.

Tabla 1. Dimensiones mínimas por tipo de digestor en localidades rurales

| Tipo de Digestor | Carga diaria       | Volumen de Digestor | Fuente          |
|------------------|--------------------|---------------------|-----------------|
| Flujo pistón     | 32 kg de estiércol | 5.8 m <sup>3</sup>  | (Martí, 2008)   |
| Lotes            | -                  | 6.3 m <sup>3</sup>  | (Varnero, 2011) |

Al no encontrar datos de volumen para la laguna anaerobia cubierta, se realiza un aproximado basado en la necesidad de espacio de una planta tratadora de aguas residuales en Comitán, México, considerando la proporcionalidad de los datos.

Primeramente, se calcula la generación de aguas residuales en una población rural escenario de 500 personas. Considerando una reducción del 30% al promedio nacional de consumo (180 l/d/per cápita), se obtienen 125 litros al día per cápita, o 63,000 litros al día en la comunidad escenario. Esto equivale a 0.7 litros por segundo.

Una vez que se tiene el flujo a tratar, se realiza el cálculo para el área requerida. La planta en Comitán trata un flujo de 160 litros por segundo y cuenta con un área de 8,500 m<sup>2</sup> en lagunas anaerobias (Paredes *et al.*, 2015). Una regla de tres simple se aprecia de la siguiente manera:

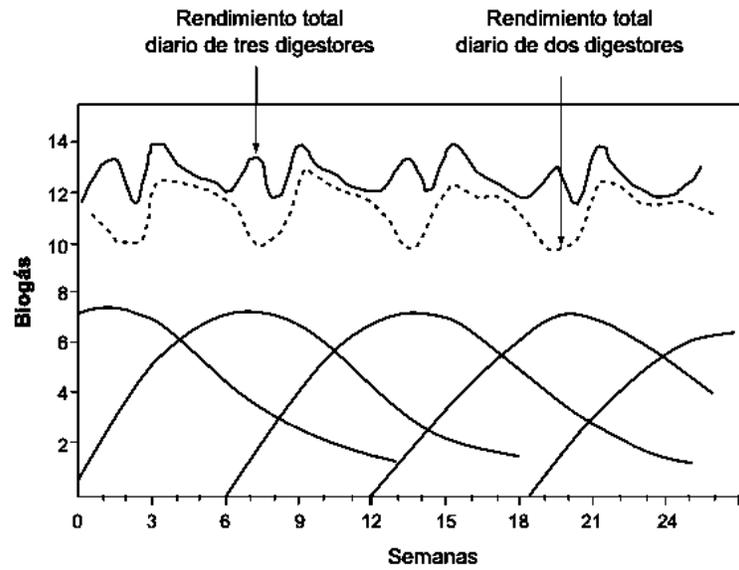
$$\frac{160 \text{ L/s}}{1 \text{ L/s}} = \frac{8,500 \text{ m}^2}{x}$$

$$x = 53 \text{ m}^2$$

La referencia a utilizar en la matriz para definir el espacio mínimo para una laguna anaerobia es 50 m<sup>2</sup>.

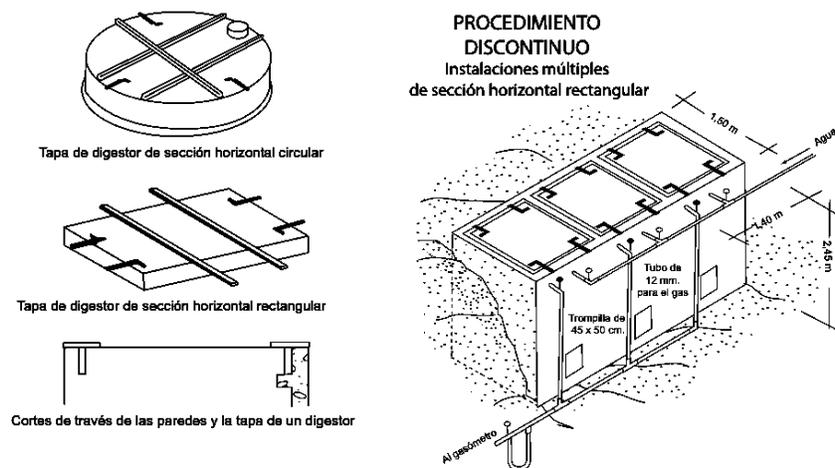
## Anexo F. Diseño de digestores por lotes

La producción de biogás por lotes se visualiza en la Figura 1, así como el diseño de los digestores se observan en la Figura 2.



**Figura 1.** Generación de biogás en digestores por lotes

(Varnero, 2011)



**Figura 2.** Diseño de un digestor por lotes

(Varnero, 2011)