**GEF Program for the Implementation of Prioritized ESC Projects in Three Mexican Cities**

**Investment Grant**

**(ME-G1012)**

**Análisis Técnico**

**Componente 1: Biodigestor para tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos**

# Objetivo y justificación del componente 1

El objetivo del proyecto propuesto es aumentar la capacidad de mitigación y adaptación en tres ciudades de México a través de la preparación y ejecución de proyectos en energía limpia, manejo de residuos sólidos y los sectores de agua y saneamiento, y el desarrollo de las entradas para permitir su replicabilidad proponiendo directrices para permitir su replicación. Para lograr este objetivo, el programa se ha diseñado cuatro componentes, uno para cada una de las tres ciudades y un cuarto para el apoyo institucional y técnico, la estrategia de comunicación y el sistema de monitoreo.

Los componentes del programa son:

**Componente 1**. Gestión integral de RSU en Xalapa. Este componente financiará la implementación de una planta de biodigestion dentro del sistema de gestión de residuos sólidos de Xalapa. El componente financiará (i) estudios de viabilidad; (ii) los equipos de pretratamiento; (iii) la instalación de un biodigestor y el equipo necesario para la generación de energía; (iv) el post tratamiento posterior y el compostaje; y (v) obras civiles.

**Componente 2**. Plantas de energía solar fotovoltaica para autoconsumo en edificios públicos y escuelas en La Paz

**Componente 3**. Programa integral para el saneamiento de la Bahía de Campeche, estudio de viabilidad y desarrollo técnico.

# descripcion de la Situación actual

## Aspectos Legales

En México, los servicios de limpia han sido regulados tradicionalmente por:

* la Ley Orgánica Municipal de cada estado
* La Ley de Desarrollo Urbano
* Las Leyes Hacendarias
* Los Bandos de Policía y Buen Gobierno municipales
* Los reglamentos municipales

Cuando a partir de fines de la década de los 80 surgió la legislación federal y estatal en materia de regulación ambiental, el manejo de los residuos contó con un marco más completo para su generación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final; asimismo, el gobierno federal inició la emisión de normas oficiales mexicanas (NOM) y reglas técnicas para regular dichas actividades.

Tabla 1 Marco Legal para el Manejo de los Residuos Sólidos Municipales.

|  |  |
| --- | --- |
| Ordenamiento | Descripción |
| Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos | Indica que los servicios públicos municipales que deben ser prestados por los ayuntamientos, entre ellos el servicio de limpia (Articulo 115). |
| Ley General de Salud | Establece las disposiciones relacionadas al servicio público de limpia en donde se promueve y apoya el saneamiento básico, se establecen normas y medidas tendientes a la protección de la salud humana para aumentar su calidad de vida. |
| Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente | Plantea que los sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos quedan sujetos a autorización y legislación estatal o en su caso, municipal; y la disposición final de los residuos sólidos no peligrosos, mediante rellenos sanitarios. |
| Ley Federal de Responsabilidad Ambiental | Establece la responsabilidad ambiental asociada al mal manejo de residuos peligrosos. |
| Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (y su Reglamento) | Establece las atribuciones de los tres órdenes de gobierno según la clasificación de los residuos como peligrosos, urbanos o de manejo especial. Define instrumentos de política y detalla la regulación de los residuos peligrosos. |
| Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas | Establecen la forma y procedimientos aplicables al manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos |
| Constitución Política Estatal | Dentro de los Artículos referentes a los municipios se hace referencia a las facultades que tienen los ayuntamientos para prestar el servicio de limpia pública. |
| Ley Estatal de Protección al Ambiente | Establece disposiciones de observancia obligatoria para cada estado, teniendo como objetivo la prevención, preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como los fundamentos para el manejo y disposición final de los residuos sólidos no peligrosos. |
| Ley Orgánica del Municipio Libre | Establecen las atribuciones de los ayuntamientos para nombrar las comisiones que atiendan los servicios públicos. |
| Bando de Policía y Buen Gobierno | Plantean el conjunto de normas y disposiciones que regulan el funcionamiento de la administración pública municipal. |
| Reglamento de Limpia | El reglamento regula específicamente los aspectos administrativos, técnicos, jurídicos y ambientales para la prestación del servicio de limpia pública. |

* Reglamento de servicios municipales de Xalapa
  + Fija “las bases para realizar la recolección y transporte de los residuos sólidos municipales no peligrosos, obtener su aprovechamiento e instalar centros de acopio, rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de basura o cualquier otro sistema de destino final; a fin de evitar que se originen focos de infección, peligro o molestia a los habitantes del municipio”.
  + Incluye de manera detallada definiciones y clasificación de los residuos urbanos y de manejo especial, así como la regulación de todas las fases de su manejo, derechos y obligaciones de los ciudadanos.
* Reglamento de Conservación Ecológica y Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Municipio de Xalapa, Ver.
  + Asigna a la Subdirección de Medio Ambiente municipal la facultad de “aplicar las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos y de conformidad a lo establecido por las Normas Oficiales Mexicanas”. Dicha subdirección sería la principal reguladora de este servicio, incluyendo la definición de las rutas y horarios de recolección, la ubicación de centros de acopio.
  + Asigna a la Subdirección de Limpia Pública la tarea de recolectar los residuos sólidos urbanos ordinarios e industriales no peligrosos.
  + En sus artículos 124 a 143 (Sección V) detalla lo relativo al manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales; en particular, estipula la necesidad de concesión municipal para quienes “generen, recolecten, transporten, almacenen, traten, usen, reúsen, reciclen o dispongan de residuos sólidos municipales” (art. 125, 127).

## Sistema de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos

El servicio de limpia en el municipio de Xalapa está a cargo de la Dirección de Servicios Públicos Municipales del Ayuntamiento, que se encarga entre otras funciones del barrido manual, la recolección diaria en tres turnos (matutino, vespertino y nocturno) y la disposición final en el relleno sanitario “El Tronconal” (esta última etapa del manejo está concesionada a PROACTIVA).

Además de los servicios proporcionados por el Ayuntamiento, en Xalapa hay centros de acopio, así como recolección de residuos procurada por particulares, completándose de este modo las fases del manejo de los residuos sólidos urbanos.

En 2016 Xalapa genera 396.4 toneladas de residuos sólidos, con una cobertura de recolección del 97.5%, sin embargo solamente se dispone en el relleno sanitario “El Troconal” el 92% debido a que existen prácticas de pepena y valorización tanto por los empleados del servicio de limpia, así como particulares. De acuerdo con los estudios realizados por el BID, se espera que la generación vaya en aumento alcanzando las 404 toneladas diarias en 2018 y se llegue a 456 para el año 2035.

La composición de los residuos sólidos tras el análisis realizado con la información aportada por el Ayuntamiento, indica que el 38.79% es materia orgánica apta para la generación de biogás y energía eléctrica mediante un proceso de biodigestión, el 41.75% son residuos reciclables y el 19.46% restante es materia para disposición final.

El promedio de viajes que realizan en un día los vehículos del Ayuntamiento al relleno sanitario es 97 descargas en los tres turnos, siendo hasta de 15 en una hora, con una carga media de 3,550 kilogramos por camión. El tiempo de descarga (entrada y salida) es de 15 minutos.

Con los datos e indicadores obtenidos en los estudios realizados se planteó el dimensionamiento y diseño conceptual del sistema de tratamiento de residuos sólidos municipales con generación de energía eléctrica para el municipio de Xalapa, bajo dos escenarios:

* Escenario 1. Sistema de recolección mezclada.
* Escenario 2. Sistema de recolección selectiva (orgánica e inorgánica).

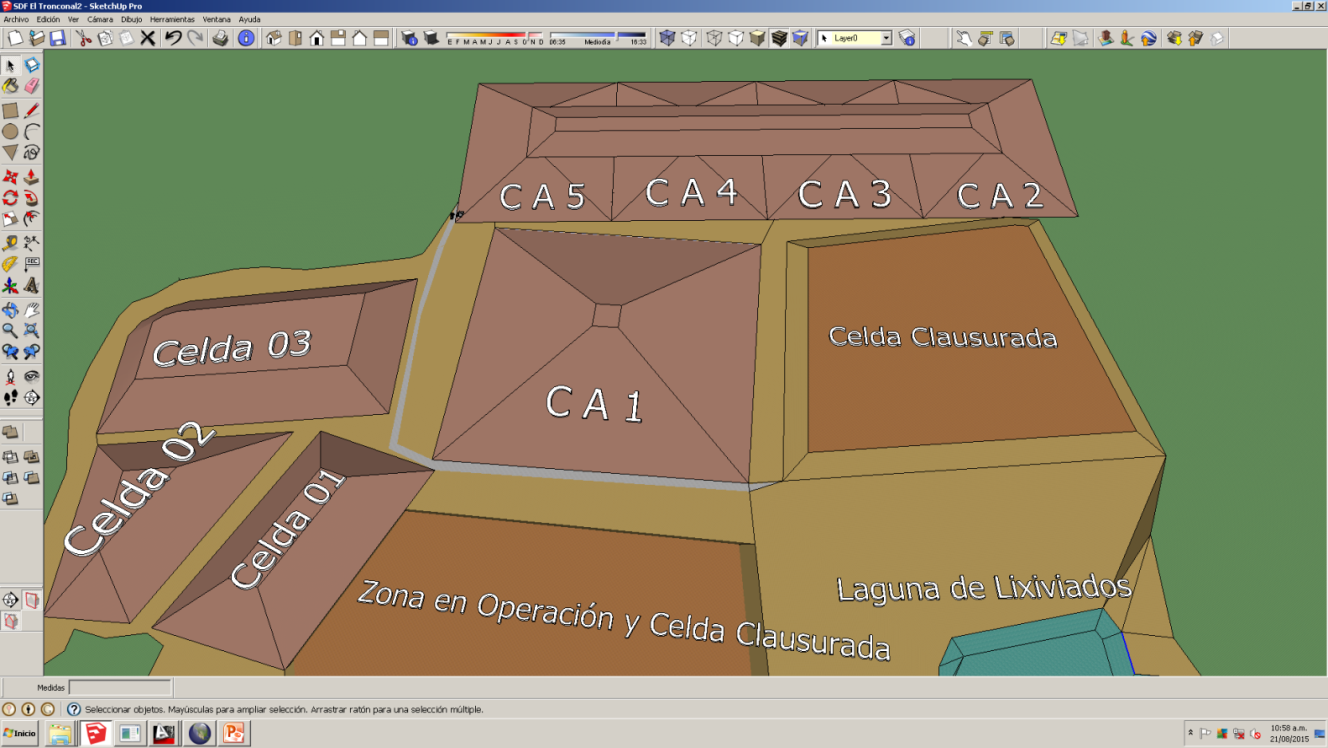
Dada las complejidad de montar un sistema de recolección separada, para efectos del análisis de la operación se ha trabajado con la opción de recolección mezclada

## Extensión de Relleno Sanitario

En las secciones siguientes e indica que un beneficio del proyecto es el aplazamiento de la inversión del relleno sanitario. La estimación de los beneficios asociados al aplazamiento de inversiones en el sitio de disposición final se sustentó en la construcción de modelos de costos para las situaciones sin y con proyecto (esta última desarrollando a su vez escenarios para residuos sólidos recolectados tanto de forma mezclada como separada en origen). Cada uno de los modelos desarrollados estima los costos de inversión, así como de operación fija y variable, requeridos durante el horizonte de análisis para que el relleno sanitario cuente con una oferta suficiente a fin de atender la demanda asociada a las situaciones y escenarios evaluados.

En el caso particular del dimensionamiento de la oferta, éste consistió en diseñar una ampliación del actual relleno sanitario de la ciudad en una superficie de 14Ha colindantes al mismo , lo cual implicó el considerar la construcción de 5 celdas anexas (CA1, CA2, CA3, CA4 y CA5) y la continuidad de tres celdas interiores (C1, C2 y C3), tal como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 1 Diseño para Ampliación del Relleno Sanitario El Tronconal

**

A partir del arreglo básico anterior, se cuantificaron las obras requeridas para la ampliación del relleno sanitario, obteniéndose tanto las volumetrías de obra como los costos de inversión en infraestructura correspondientes; éstos últimos se cuantificaron a través de un catálogo de conceptos con precios de referencia obtenidos de tabuladores de obra mexicanos. Ello quiere decir que cada una de las etapas de ampliación está asociada a un volumen disponible para el confinamiento de los residuos (capacidad volumétrica), así como a un orden de ejecución en el tiempo (secuencia constructiva), elementos señalados en tabla siguiente:

Tabla 2 Secuencia Constructiva, Capacidad Volumétrica e Inversiones para Relleno Sanitario.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Secuencia Constructiva** | **Capacidad Volumétrica**  **(m3)** | **Capacidad Acumulada**  **(m3)** | **Capacidad Acumulada**  **(ton)\*** |
| Celda 1 | 222,921 | 491,476 | 368,491 |
| Celda 2 | 189,525 | 681,000 | 510,590 |
| Unión Celda 1 y Celda 2 | 89,035 | 770,035 | 577,346 |
| Celda 3 | 469,431 | 1,239,466 | 929,309 |
| Unión Celda 2 y Celda 3 | 70,769 | 1,310,235 | 982,369 |
| Celda Anexa 1 | 1,062,250 | 2,372,485 | 1,778,808 |
| Uniones con Celda Anexa 1 con Anteriores | 412,552 | 2,785,037 | 2,088,125 |
| Celda Anexa 2 | 451,526 | 3,236,563 | 2,426,664 |
| Celda Anexa 3 | 451,526 | 3,688,089 | 2,765,203 |
| Unión Celda Anexa 2 y 3 | 47,232 | 3,735,321 | 2,800,616 |
| Celda Anexa 4 | 451,526 | 4,186,847 | 3,139,155 |
| Unión Celda Anexa 3 y 4 | 47,232 | 4,234,079 | 3,174,567 |
| Celda Anexa 5 | 451,526 | 4,685,606 | 3,513,106 |
| Unión Celdas Anexas 4 y 5 | 47,232 | 4,732,838 | 3,548,519 |
| Unión Celda Anexa 4 y 1 | 169,375 | 4,902,213 | 3,675,511 |

\* Considera una compactación de los residuos de 0.8 ton/m3 y un porcentaje de cubierta de 6.7%.

Ahora bien, desde el punto de vista de la demanda, fue necesario determinar la cantidad anual de residuos a disponer en el relleno sanitario para el horizonte de análisis a partir de la proyección dos variables: la población de la ciudad por atender y la generación per-cápita de residuos.

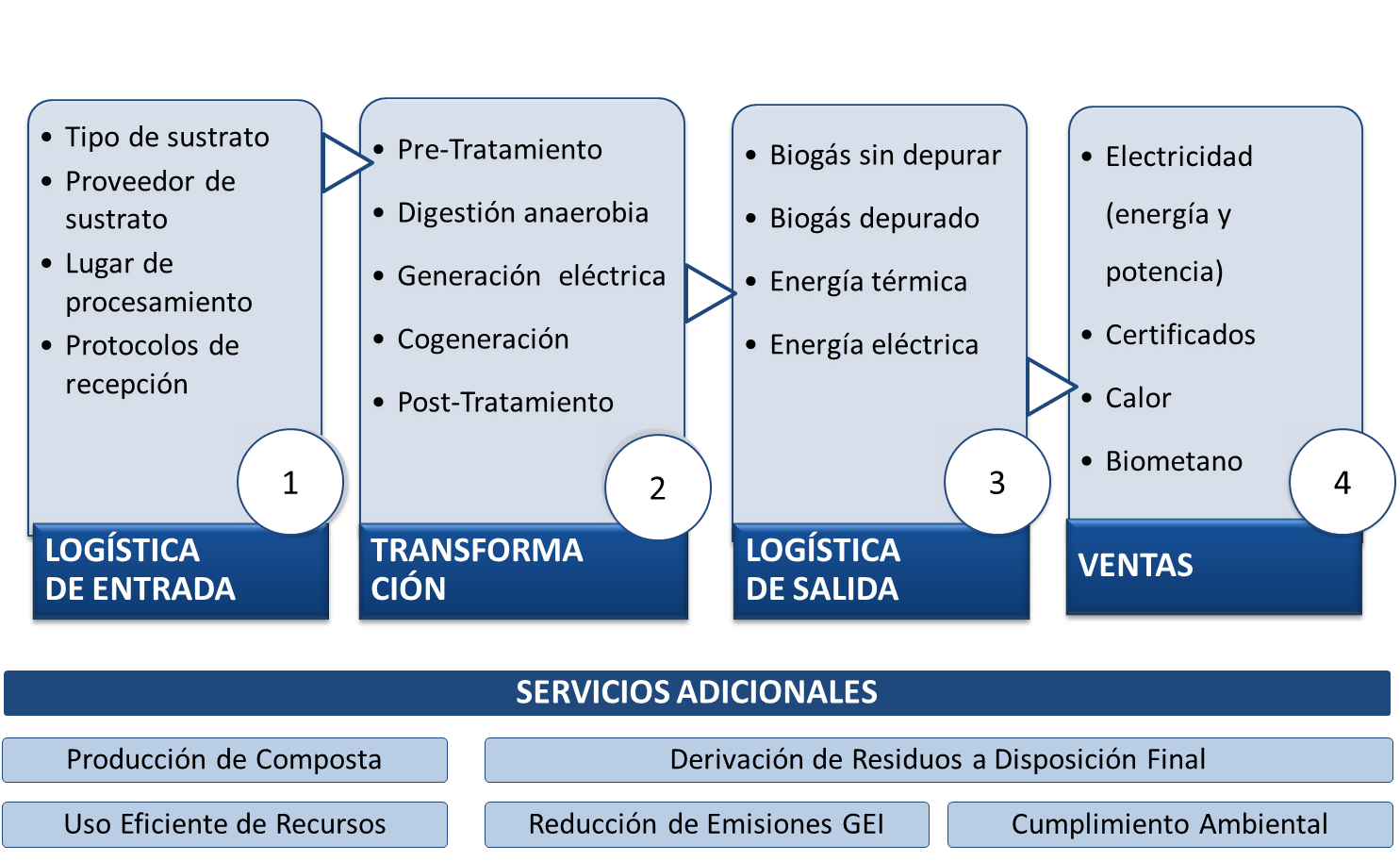
El crecimiento poblacional se obtuvo tomando como base la información del censo nacional de población del INEGI para el año 2010 y actualizándola mediante las tasas asociadas a las proyecciones de CONAPO para el período 2005-2030. Por otra parte, la variación de la tasa de generación per cápita para el Municipio se estimó al aplicar un factor de crecimiento del 1% anual (recomendaciones de SEDESOL) sobre el indicador obtenido para Xalapa en 2015 (Como parte de la Fase de Implementación del Plan de Acción de la ICES para Xalapa, en 2015 se estimó la generación per-cápita de la ciudad en 0.854 kg/hab\*día, tomando en cuenta para su cálculo: el porcentaje de cobertura del servicio de recolección, las toneladas de residuos recolectadas que ingresan al relleno sanitario, las toneladas de residuos valorizadas que no ingresan al relleno sanitario, así como la población proyectada a 2015 con base en el censo 2010 de INEGI y las tasas de crecimiento de CONAPO 2010-2030).

## Cadena de Valor del Biogás

A nivel mundial, el principal uso del biogás está orientado a la generación de energía eléctrica utilizando motores de combustión interna, ello debido a que generalmente el costo de transportar electricidad es muy inferior al de transportar directamente cualquier gas combustible; además que dicha alternativa permite también aprovechar el calor de los gases de escape de los motores y/o del agua de refrigeración mediante sistemas de cogeneración.

En dicho sentido, la cadena de valor asociada a un sistema de aprovechamiento de biogás como el descrito anteriormente consistiría de cuatro componentes y un grupo de servicios adicionales, tal como se muestra en la siguiente figura

Figura 2 Cadena de valor de Biogas



La primera fase de la cadena en cuestión comprende la logística de entrada, es decir el proceso dónde se adquieren los recursos para el desarrollo del negocio, siendo fundamental en este caso determinar el tipo de sustrato a tratar, quién lo proveería, las condiciones en las que sería recibido y el lugar donde sería procesado.

Posteriormente tendría lugar la etapa de transformación, en la cual el biogás es producido mediante un proceso bioquímico, el cual requiere generalmente de una fase inicial de pre-tratamiento para adecuar el sustrato a ser procesado, así como de fases ulteriores encaminadas al acondicionamiento del biogás en función del uso final que se le vaya a dar (sustituto de otros combustibles o generación de energía térmica/eléctrica) y también al post-tratamiento de los subproductos generados por la digestión en sí.

De suma relevancia para esta etapa de la cadena de valor es la selección de la tecnología apropiada para la producción del biogás, especialmente debido al hecho de que en el mercado existen sistemas con diversos grados de eficiencia, así como proveedores con experiencias heterogéneas, lo cual da pie a cierta incertidumbre durante el proceso de toma de decisión.

Una vez producido el biogás, tiene lugar la logística de salida, es decir, del tipo de producto terminado que tendría un valor para uso propio o para un tercero. En dicho sentido, el producto en cuestión puede comprender:

1. Biogás sin depurar o depurado con el propósito de ser utilizado para sustituir otro tipo de combustibles.
2. Energía eléctrica y/o térmica mediante equipos integrados en la planta, la cual puede estar asociada a consumos propios del productor (autoconsumo) o bien a su venta hacia terceros.

Finalmente, tiene lugar el proceso de venta del producto que se defina obtener, requiriéndose desarrollar los esquemas de comercialización apropiados para minimizar los riesgos económicos del negocio. A continuación, se presentan algunas consideraciones sobre la venta de los distintos productos vinculados a la producción de biogás:

1. Venta de energía y potencia eléctrica:
   1. Si la producción de energía se destina a autoconsumo, los ingresos corresponderán a los ahorros asociados a los menores retiros de energía y potencia que se realicen del sistema eléctrico.
   2. Por otra parte, si lo que se pretende es comercializar en el sistema eléctrico excedentes de generación eléctrica, será necesario familiarizarse con la estructura y regulación del mercado.
2. Venta de certificados asociados a la generación de energía de fuentes renovables y/o energía limpia, lo cual dependerá también de la estructura y regulación del mercado correspondiente.

Venta de energía térmica originada por un proceso de cogeneración

* 1. La cogeneración es la alternativa más utilizada hoy en día ya que corresponde al modelo de generación de mayor eficiencia energética, con la valorización de hasta un 86% de la energía que contiene el biogás.
  2. De ser posible valorizar la energía térmica, el riesgo de participar en el mercado eléctrico disminuye por efecto de diversificación de ventas

La cadena de valor del biogás cuenta también con ciertos servicios o adicionalidades del negocio, los cuales corresponden principalmente a:

1. Producción de composta:
   1. El material remanente tras el proceso de transformación o digestato, puede ser tratado mediante procesos aeróbicos para producir fertilizante orgánico.
   2. En caso que el fertilizante pretenda ser comercializado, será de suma relevancia contar con un marco normativo que permita controlar y garantizar su calidad, así como la existencia de un mercado maduro para su venta.
2. Derivación de residuos a disposición final.
   1. Los residuos que, como resultado del proceso de tratamiento, dejan de ser confinados en un sitio de disposición final dar lugar a beneficios de tipo indirecto relacionados con ahorros en inversiones y costos de operación, así como en extensión de la vida útil del relleno sanitario en cuestión.
3. Uso eficiente de recursos.
   1. Por otra parte, el aprovechamiento de los residuos sólidos para su transformación en distintos productos derivados del biogás implica que éstos serán reincorporados a procesos productivos, optimizando de este modo el uso de los recursos naturales y reduciendo también su explotación como materia prima virgen.
4. Reducción de emisiones de GEI.
   1. Al ser comparado con una línea base, el sistema de tratamiento podría evitar emisiones de forma directa como resultado de la desviación de residuos a disposición final, así como por la utilización para autoconsumo de la propia energía producida.
   2. También podría tener lugar una reducción adicional de tipo indirecto al generar energía de fuentes renovables o limpias que desplaza una proporción de aquella producida a través de la matriz energética de cada país, ello en función de la participación que los combustibles fósiles tengan en la misma.
5. Cumplimiento ambiental.
   1. Finalmente, un servicio adicional vinculado a la cadena de valor del biogás estaría relacionado al cumplimiento y satisfacción de legislaciones y regulaciones locales en materia de tratamiento de residuos sólidos y generación de energía renovable/limpia.

# DESCRIPCION DE PROYECTO DE BIODIGESTORES

## Situación General

La utilización de la biomasa para la generación de energía en lugar de combustibles fósiles podría conllevar una serie de ventajas, tales como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ahorro en costos energéticos, incremento en la certeza del abastecimiento energético, así como oportunidades para la reducción y manejo de residuos sólidos, entre otras.

En dicho sentido es necesario considerar tres componentes críticos para su implementación

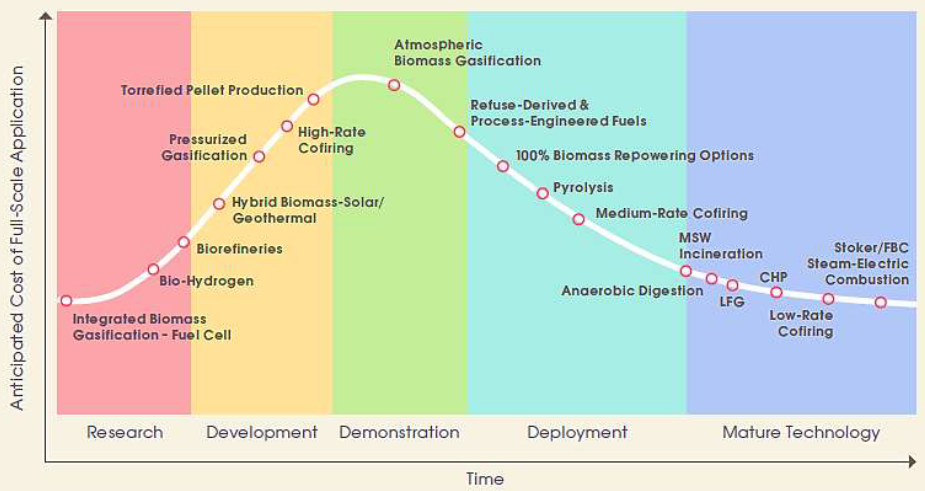
1. Tipo de biomasa utilizada como materia prima, ya que sus propiedades impactan directamente en su uso para la generación de energía.

2. Conversión de la biomasa, es decir el proceso mediante el cual la biomasa utilizada como materia prima es transformada en forma de energía, la cual será usada para generar calor y/o electricidad.

3. Las tecnologías para la generación de energía que utilizan biomasa como combustible de entrada.

Por otra parte, la biomasa puede ser convertida en energía mediante procesos termo-químicos o bio-químicos, ello mediante un amplio espectro de tecnologías de generación, las cuales pueden encontrarse en distintas fases de maduración, desde soluciones probadas comercialmente y vinculadas a un nutrido grupo de proveedores o en etapa de implementación a escala comercial, hasta aquellas ubicadas apenas en procesos de investigación y desarrollo, tal y como se puede observar a continuación.

Figura 3 Nivel de Maduración de las Tecnologías para la Generación de Energía a partir de Biomasa



Usualmente las tecnologías para generación de energía a tomar en cuenta con objeto de ser evaluadas deben, además de considerarse como maduras y estar disponibles comercialmente, utilizar como materia prima de entrada biomasa relacionada con los residuos sólidos urbanos o sus subproductos. En dicho sentido, las soluciones seleccionadas son:

1. Incineración de residuos sólidos urbanos (MSW Incineration - WTE).

2. Digestión anaerobia (Anaerobic Digestión).

3. Relleno sanitario con aprovechamiento de biogás (Landfill Gas - LFG).

### Relleno Sanitario con Aprovechamiento de Biogás

Los rellenos sanitarios modernos con aprovechamiento de biogás, son obras de ingeniería, diseñadas a partir de criterios técnicos, económicos y ambientales, los cuales toman en cuenta aspectos constructivos y operativos tales como: impermeabilización basal, compactación y cobertura diaria, así como cubierta impermeable en las zonas clausuradas; captación, conducción, almacenamiento y tratamiento de lixiviados; captación, control y aprovechamiento del biogás generado por la descomposición de la materia orgánica en la masa de residuos.

La complejidad operativa de esta infraestructura, considerando la experiencia existente en Latinoamérica sobre rellenos sanitarios con aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica, se considera moderada, dependiendo de su tamaño. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que tras el proceso de confinamiento, se generan como subproductos tanto lixiviados como biogás, los cuales deben ser almacenados y tratados mediante instalaciones específicas.

Esta alternativa tecnológica requiere grandes extensiones de terreno para su implementación, a lo cual se suma la relativamente baja aceptación social que generalmente la acompaña, dificultando en algunos casos tanto su instalación como operación.

### Incineración de RSU - WTE

En Europa durante los años 1970´s, emergieron tecnologías avanzadas para una incineración eficiente de RSU en calderas, acompañada con recuperación de energía. Estas tecnologías evolucionadas proporcionaron altas eficiencias de combustión y por lo tanto, menor generación de contaminantes atmosféricos en comparación que la quema a cielo abierto de desechos. Las soluciones modernas reducen el volumen y peso de los RSU incinerados aproximadamente en un 90% y 75% respectivamente, al mismo tiempo que eliminan patógenos y recuperan energía de los desperdicios. A pesar de que en su etapa inicial, los esquemas WTE implicaron un avance significativo respecto al confinamiento del RSU, en los años 1980´s surgieron públicamente inquietudes respecto a las emisiones asociadas de dioxinas/furanos y mercurio, ante lo cual fueron adoptados nuevos métodos de control de emisiones, reduciendo dramáticamente sus niveles contaminantes.

Para las tecnologías de incineración, los RSU utilizados como combustible deben contar con un poder calorífico suficiente para asegurar una combustión eficiente y una generación de energía económicamente viable, por lo cual la composición de los desechos y su acondicionamiento son fundamentales.

El proceso de tratamiento térmico típico de una planta moderna para la incineración de RSU comprende:

1. La entrada continua de los residuos en un horno cerrado sobre una parrilla móvil.

2. Mientras los desechos se mueven a lo largo del horno, tiene lugar su completa combustión a altas temperaturas.

3. Mediante el ajuste del suministro de aire y la velocidad de la rejilla, se controla la incineración para asegurar que acurra una combustión completa.

4. Las cenizas resultantes de la incineración son removidas de la rejilla de la caldera, así como filtradas del gas de la combustión, comprendiendo las primeras el 85% de las cenizas totales.

5. Las emisiones de contaminantes a la atmósfera son mitigadas a través de una combinación de buenas prácticas de combustión, además de aditamentos complementarios para su control.

6. El calor generado por la incineración se utiliza para producir vapor en una caldera, el cual activa una turbina para generar energía eléctrica (algunas plantas WTE proveen ambos tipos de energía, tanto térmica como eléctrica).

La escala de operación de este tipo de soluciones tecnológicas fluctúa entre 100 a 1,000 toneladas por día, contando con costos de inversión entre los 15 a 475 MUSD y de operación entre los 40 a 50 USD por tonelada procesada, así mismo, su capacidad para generar energía eléctrica se ubica aproximadamente en los 600 kWh/ton.

La implementación de sistemas de incineración de RSU es generalmente recomendable para grandes centros urbanos con una economía industrial/comercial robusta y una capacidad municipal adecuada desde el punto de vista financiero/inversión, que cuente además con una fuerza de trabajo altamente capacitada. Excepciones pueden presentarse para zonas urbanas donde factores no económicos incidan significativamente en hacer poco factible la instalación de rellenos sanitarios, tal es el caso de ubicaciones con características particulares del subsuelo (nivel de aguas freáticas cercano a la superficie o geologías de tipo calcáreo, por ejemplo) o con escasez de superficies disponibles (islas o zonas montañosas, por ejemplo).

La tecnología de combustión WTE es técnicamente compleja y requiere una hábil operación y mantenimiento cuidadoso, esto significa contar con personal especializado y con un alto nivel de capacitación. Existe amplia experiencia comercial en América del Norte, Europa y Japón, limitada en el Caribe y ninguna en América Latina.

Finalmente, el requerimiento de superficie asociado a esta alternativa tecnológica es mucho menor que aquel utilizado por un relleno sanitario de capacidad similar. Debido a lo anterior, desde el punto de vista de uso de suelo y como se mencionó previamente, las plantas de incineración de RSU están mejor posicionadas para atender regiones donde exista una escasez de superficie disponible, ésta sea demasiado costosa o el suelo tenga propiedades incompatibles para instalar un relleno sanitario.

### Digestión Anaerobia.

La Digestión Anaerobia es un proceso biológico que ausencia de oxígeno transforma biomasa con un contenido relativamente alto de humedad en un gas rico en metano, ello a semejanza de lo que ocurre en la naturaleza, proveyendo una manera efectiva de tratar materia orgánica de distintas fuentes generadoras.

Típicamente, la materia prima de entrada a ser digerida es pre-procesada de forma mecánica, tanto para reducirla a un tamaño de partícula uniforme, como para separar la fracción orgánica biodegradable, removiendo para ello aquellos materiales inertes no deseados y permitiendo de este modo maximizar la producción de metano, así como minimizar la posibilidad de inhibir el proceso natural de digestión.

En dicho sentido, aquellos sustratos apropiados para este proceso incluyen lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y estiércol de animales, residuos de actividades agrícolas y madereras, así como los subproductos biodegradables de los residuos sólidos urbanos, entre otros: papel, desperdicios alimenticios, grasas y aceites usados, desechos de mataderos, así como podas de parques y jardines.

Durante un proceso de Digestión Anaerobia, los materiales orgánicos biodegradables son contenidos en un depósito cerrado, permitiendo su digestión (fermentación) sin presencia de oxígeno. Una vez que la materia prima orgánica es digerida, una porción del carbono presente en la biomasa es transformada en un gas rico en metano (denominado biogás), el cual, tras ser limpiado, puede ser utilizado como combustible para la generación de energía. El procesamiento biológico de la materia prima ocurre en dos fases. En la primera de ellas, un grupo de microorganismos denominados como “formadores de ácidos” descomponen materiales orgánicos complejos en un ambiente ácido. Para la segunda fase, una variedad diferente de microrganismos, llamados “formadores de metano”, descomponen el producto de la primera etapa, consumiendo el material orgánico para formar biogás.

Una vez que el proceso de digestión se ha completado, queda como subproducto un residuo sólido denominado “digestato”, el cual tras ser deshidratado mecánicamente (alcanzando típicamente entre un 13% y 35% del peso de los residuos recibidos para tratamiento), debe pasar por una fase de curado mediante su aireación en pilas de composteo antes de poder ser utilizado como fertilizante, o en caso contrario, debe ser confinado en un relleno sanitario.

La escala de operación de este tipo de plantas fluctúa entre 60 a 700 toneladas por día, recomendándose su instalación en grandes ciudades cuando exista la necesidad de contar con fuentes de energía locales y se presente una fuerte oposición a la construcción de sistemas para la incineración de residuos. Por otra parte, los costos de inversión asociados a dicha solución tecnológica se encuentran entre los 3.8 a 144 MUSD, mientras que los de operación van desde los 20 a 50 USD por tonelada procesada. Así también, la generación de energía asociada se ubica entre los 100 a 245 kWh/ton tratada.

Debido al carácter crucial de contar con materia prima que cumpla con las características óptimas de calidad requeridas por el proceso de digestión, la operación de la maquinaria para el pretratamiento de los RSU requiere de personal apropiadamente capacitado; a lo cual debe sumarse la necesidad de contar con mano de obra especializada para el manejo de los equipos de biodigestión y generación de energía, por tal motivo, se considera que la complejidad operativa de esta infraestructura ambiental es alta.

Finalmente, debe señalarse el proceso de Digestión Anaerobia para RSU en sí requiere solamente entre un 25% a 50% de las superficie que un tratamiento térmico (como la incineración) y mucho menos que un relleno sanitario. Sin embargo, la necesidad de contar con un pre-tratamiento más complejo en el caso de RSU mezclados, así como el hecho de que el digestato deba ser estabilizado posteriormente, genera un requerimiento de suelo adicional sustantivo. En términos globales, una instalación de Digestión Anaerobia y sus zonas de pre-tratamiento – composteo podrían probablemente requerir la misma o mayor cantidad de área que una tecnología de tipo térmico, pero todavía menor que un relleno sanitario.

### Selección de Tecnología

Revisando de forma comparativa los perfiles generales (desde las perspectivas de sustentabilidad, medioambiente, económica e institucional) para las tres tecnologías objeto de estudio, es posible valorar su factibilidad, en el contexto del estado actual del sector residuos sólidos en México y particularmente con relación al sistema existente de gestión en la Ciudad de Xalapa, para la instalación de un sistema de tratamiento de desechos con generación de energía eléctrica.  
Tabla 3 Atributos de Sostenibilidad de las Tecnologías Consideradas.

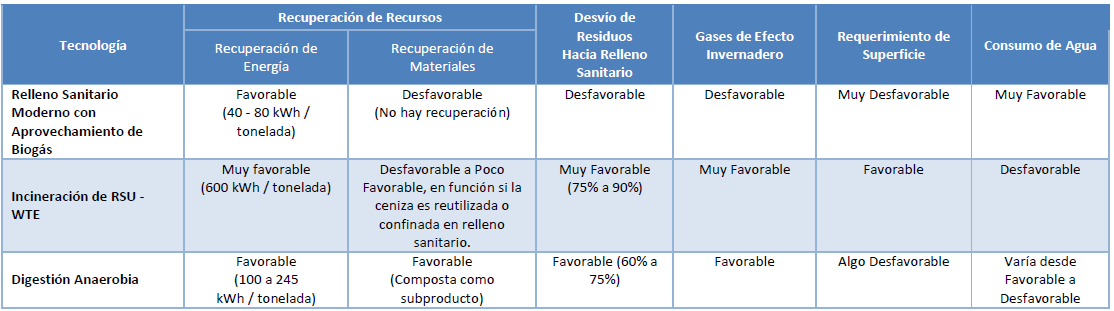


Tabla 4 Atributos Medioambientales de las Tecnologías Consideradas.

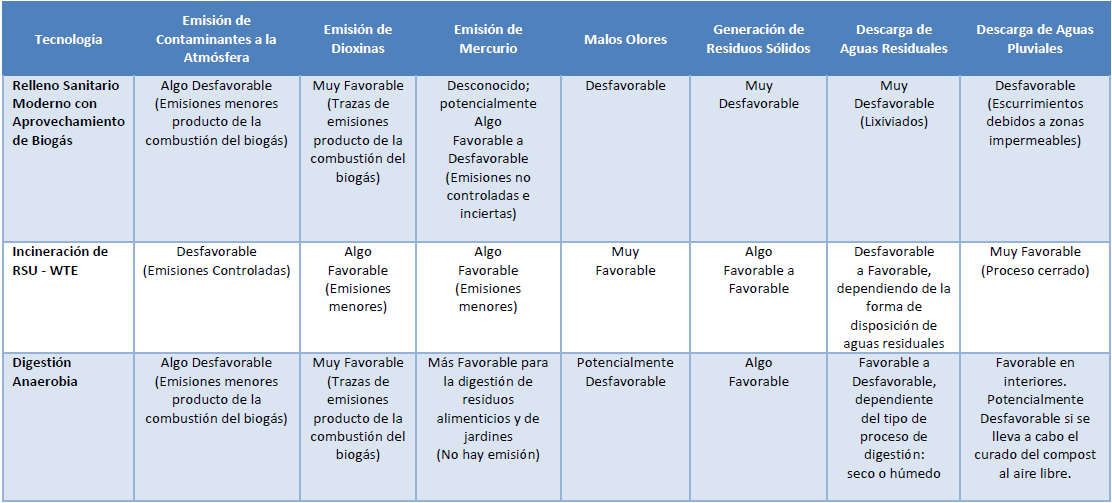
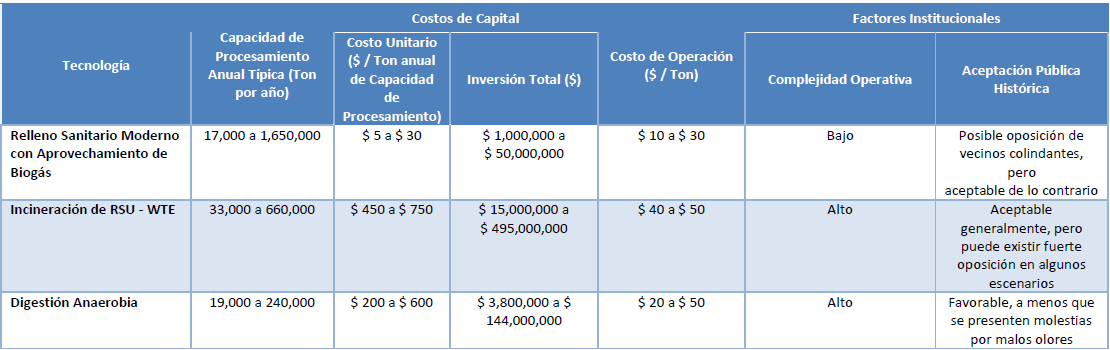


Tabla 5 Factores Económicos e Institucionales Asociados a las Tecnologías Consideradas.



El Relleno Sanitario Moderno con Aprovechamiento de Biogás, debido a su amplio rango de capacidades de procesamiento, bajos costos de capital y operación, poca complejidad operativa, índices favorables de recuperación de energía, pero sobre todo por la experiencia favorable del Municipio de Xalapa de contar desde hace prácticamente 15 años con este tipo de solución tecnológica (exclusivamente en su componente de confinamiento) a través de un contrato de concesión con una empresa privada, parecería ser la alternativa idónea y natural a seguir por la ciudad.

Sin embargo, estudios de factibilidad para el aprovechamiento de biogás en el sitio de disposición final en cuestión presentados por la empresa concesionaria en 2013 indicaron que, a pesar de encontrarse en una fase de producción de metano anaerobia estable, “la generación de biogás es baja, por lo que hacer las inversiones necesarias para el aprovechamiento, dado el corto tiempo de concesión restante, el bajo volumen de generación, así como la calidad del biogás que se produce, no es una opción económicamente viable”, con base en lo cual es posible descartar en el corto plazo este tipo de infraestructura ambiental.

La Incineración de RSU – WTE presenta, entre las opciones consideradas, los costos de capital y operación más altos, así como el mayor grado de complejidad técnica; características intrínsecas a esta tecnología, las cuales sumadas al hecho de que en México no existan instalaciones de esta naturaleza, llevan a cuestionar seriamente su viabilidad en el caso de la Ciudad de Xalapa.

Finalmente, el proceso de Digestión Anaerobia para RSU se destaca como una alternativa intermedia, presentando generalmente atributos de sostenibilidad, medioambiente, económicos e institucionales posicionados en rangos favorables a muy favorables; así como contando con referencias en el país de plantas construidas recientemente o en proceso de implementación (El Municipio de Atlacomulco en el Estado de México concluyó la instalación de un sistema de Digestión Anaerobia para procesar 30 ton/día en el año 2015, mientras que los Municipios de Calvillo, Asientos, San Francisco de los Romo en Aguascalientes iniciaron la construcción de una planta similar en 2016), ello como parte de la política nacional de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para fomentar infraestructura ambiental que contribuya a cumplir los compromisos nacionales en materia de reducción de emisiones del sector residuos (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2015). Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México, Perspectiva de la SEMARNAT. Lic. Carlos Sánchez Gasca, Director General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico. Foro Internacional 2015, Valorización Energética de Residuos Urbanos, Experiencias y Estrategias Globales). Las razones esbozadas, permiten sustentar la selección de esta tecnología como la más apropiada para el objetivo y alcances del presente estudio.

## Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento

### Criterios de Diseño

Considerando a la Digestión Anaerobia como la alternativa tecnológica más apropiada para la Ciudad de Xalapa, el siguiente paso comprendió el dimensionamiento de las instalaciones y procesos asociados en cada una de sus fases, ello en función de las características del sistema de gestión de residuos existente

Existen variaciones entre diseños específicos de los procesos inherentes a esta tecnología en función de los siguientes factores:

1. Tiempo de retención de la materia prima de entrada en el digestor, variando generalmente entre 10 y 25 días.

2. Contenido de humedad de la materia prima en el digestor, presentándose diseños de tipo húmedo y seco.

3. Temperatura de operación durante la digestión, pudiendo existir dos tipos de regímenes: alta temperatura (termófilo) o baja temperatura (mesófilo).

4. Número de etapas de digestión, generalmente única o multi-etapa.

En el caso del contenido de humedad, un sistema de digestión húmedo implica operar con un contenido de líquido mayor que en el diseño seco, siendo necesario entonces añadir agua a los residuos a tratar. Esto tiene la ventaja de permitir retirar por flotación cierto tipo de materiales inertes que se hayan mezclado con la materia prima de entrada, sin embargo, también tiene como consecuencia la pérdida de sólidos volátiles en los desechos procesados, lo cual implica menores rendimientos en la producción de biogás. Aunado a lo anterior, el proceso de digestión húmeda también autoconsume una cantidad mayor de la energía generada a través del biogás (hasta un 50%) que en el caso de la tecnología seca (20% a 30%), como consecuencia de los requerimientos de electricidad asociados al bombeo y deshidratación del sustrato procesado (Relación directa con los conceptos Digestión Anaerobia húmeda o seca es el contenido de sólidos totales del sustrato a tratar en el reactor; mientras que los sistemas para bajo contenido de sólidos contienen menos del 10% de sólidos totales y consumen un m3 de agua por tonelada procesada, las plantas para alto contenido de sólidos alcanzan un rango entre 22% y 40% de sólidos totales y requieren una décima parte del líquido para operar).

Por otra parte, un digestor mesófilo, al operar a bajas temperaturas, requiere de mayores tiempos de retención para alcanzar una degradación completa de la materia orgánica, debido a lo cual la producción de biogás es menor que en el caso termófilo. Además, los tiempos de retención más extensos resultan en mayores requerimientos de espacio y por lo tanto costos más altos para la instalación de la infraestructura. En comparación, la digestión termófila tiene mayores rendimientos en producción de biogás, tiempos de retención más cortos, menores necesidades de espacio y tamaño de equipos, pero mayores requerimientos de mantenimiento y sus costos asociados.

Con relación al número de etapas para llevar a cabo la digestión, los procesos de fase única están diseñados para ejecutar las distintas series de reacciones bioquímicas asociadas a la Digestión Anaerobia en un solo depósito cerrado, por lo que comprenden un diseño simple, así como bajos costos de capital y complejidad operativa. En el caso de los sistemas multi-fase, se pueden alcanzar menores tiempos de retención, ya que cada una de ellas es optimizada de forma individual, así como mayores rendimientos de generación de biogás, pero asociados a costos de capital mucho más altos.

Ahora bien, desde la perspectiva de los elementos que intervienen en una planta de Digestión Anaerobia, éstos comprenden tres fases secuenciales: pre-tratamiento, digestión y generación de energía, así como post-tratamiento. En dicho sentido, las actividades de pretratamiento están encaminadas, en primer lugar a la separación en la corriente de residuos de la fracción orgánica de la inorgánica, así como de otros materiales que no son susceptibles de tratamiento; tras lo cual, el sustrato biodegradable debe ser acondicionado, homogeneizando el tamaño de partícula, para alcanzar las dimensiones apropiadas a fin de promover una digestión eficiente (Otros objetivos del pre-tratamiento serían la remoción de materiales no degradables que ocuparían un espacio innecesario en el digestor, así como de componentes que puedan afectar adversamente la calidad del digestato). Generalmente, el pre-tratamiento mecánico implica los siguientes procesos:

1. Clasificación mecánica/manual para la eliminación de materiales no apropiados o voluminosos.

2. Trommels/cribas para la separación de la fracción de gran tamaño, asociada habitualmente a los componentes inorgánicos de la corriente de residuos

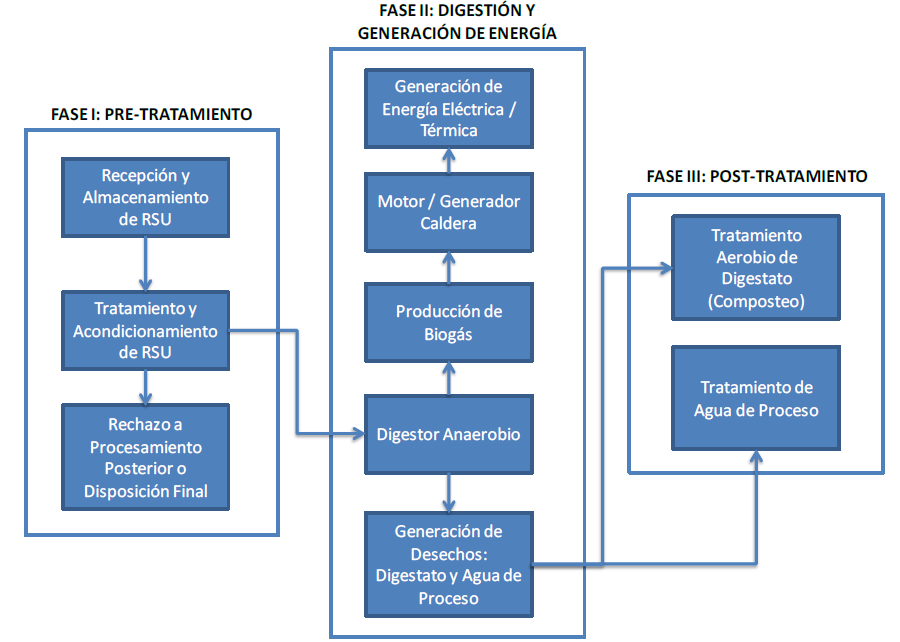
3. Molino de martillos (o similar) para la reducción de tamaño de partícula del material biodegradable de entrada.

4. Trituración / mezcla del sustrato de alimentación (dependiendo si se trata de un sistema húmedo o seco).

Después del pre-tratamiento, la fracción orgánica acondicionada se carga en el reactor donde tiene lugar el proceso de digestión, pasando primero por una fase en la que es descompuesta en ácidos grasos por microorganismos denominados formadores de ácidos; posteriormente en la etapa de metanogénesis, otro grupo de microrganismos toma los ácidos grasos para transformarlos en biogás a una tasa promedio de 100 m3 por tonelada de materia prima procesada. El biogás producido contiene habitualmente metano (40-70%), dióxido de carbono (30- 60%) y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (La presencia de sulfuro de hidrógeno crea requisitos especiales de manipulación para el biogás que salen del digestor, esto para evitar la corrosión de tuberías y la generación de sulfuro de hidrógeno en los gases de escape del sistema de generación de energía.), hidrógeno, amoníaco, vapor de agua y monóxido de carbono. El tipo de tratamiento del biogás dependerá de su uso final, aunque mínimamente el gas debe enfriarse para condensar el vapor de agua. La forma más común de uso de biogás producido por un sistema de Digestión Anaerobia es para la producción combinada de electricidad y calor mediante un motor de gas y caldera de vapor.

Una vez terminada la digestión, queda como remanente un material orgánico parcialmente estabilizado, el cual puede ser utilizado como mejorador de suelos o separado en una fracción líquida y otra sólida para proceder a la etapa de post-tratamiento. En el caso de la fracción líquida, ésta puede ser manejada con tecnologías tradicionales para aguas residuales o en algunos casos, utilizarse como fertilizante líquido. El componente sólido o digestato, requiere exclusivamente de un proceso de compostaje para su completa estabilización. En caso de que la composta no pueda ser comercializada, el digestato puede ser considerado bastante estable en comparación con la fracción orgánica de los RSU no tratados, por lo que su confinamiento en un relleno sanitario provocaría sin lugar a dudas menores impactos ambientales.

Figura 4 Diagrama de Flujo General para Sistema de Digestión Anaerobia



Fase de Pre-tratamiento. Una vez acotadas las características del proceso de digestión y generación de energía, fue posible entonces idear el tren de pre-tratamiento apropiado para satisfacer las especificaciones de operación asociadas. En dicho sentido y dado que el sistema de tratamiento a través de Digestión Anaerobia está encaminado al procesamiento de los RSU de la ciudad, se consideraron los siguientes componentes y propósitos generales:

1. Abrebolsas: para desagregar los residuos a tratar mecánicamente.

2. Trommel: utilizado con el propósito de separar la fracción orgánica contenida en la corriente de RSU.

3. Separador Férrico: permite extraer materiales ferrosos de la fracción orgánica separada y que no pueden ser digeridos.

4. Trituradora: propiamente se trata del acondicionamiento de la materia prima de entrada al tratamiento biológico, consistiendo en este caso en alcanzar el tamaño de partícula apropiada para la correcta operación del proceso de Digestión Anaerobia seleccionada: de una sola etapa, tipo seco y termófilo.

Fase de Digestión y Generación de Energía. Con relación al proceso de Digestión Anaerobia, éste se concibió como de una sola etapa, de tipo seco (es decir, capaz de manejar un alto contenido de sólidos totales, no obstante también se considerará durante la implementación del proyecto la opción del tipo extra seco, con mecanismo de túneles) y termófilo, debido principalmente a las siguientes razones:

Los procesos de tipo seco de una sola etapa requieren de un pre-tratamiento menos complejo de los residuos a digerir, pudiendo manejar impurezas tales como piedras, vidrio o madera que no requieren ser removidas. Además, no necesitan de una mezcla completa del sustrato de entrada y por ende tampoco utilizan dispositivos mecánicos al interior del reactor (por ello la prácticamente nula solicitud/generación de agua).

El operar en régimen termófilo ofrece ventajas adicionales, tales como menores tiempos de retención y por ende una reducción en las dimensiones/costos de infraestructura y equipo, higienización de los materiales digeridos, así como un mayor potencial de generación de biogás.

La implementación conjunta de estos criterios tecnológicos da lugar a un sistema de tratamiento, que a partir de una baja complejidad operativa, cuenta con gran flexibilidad para manejar RSU (mezclados o separados en origen), debido a que puede tolerar un amplio rango de variaciones en el contenido de sólidos totales de la materia prima de entrada.

Fase de Post-tratamiento.

Por último, el post-tratamiento conllevará exclusivamente el manejo del digestato producido tras el procesamiento de la materia orgánica, debido principalmente al carácter seco del sistema de Digestión Anaerobia seleccionado. Este material digerido y semiestabilizado será sometido a un procedimiento de composteo simple mediante la técnica de pilas volteadas, para finalmente ser afinado mediante un trommel como acondicionamiento previo a su uso posterior.

El principal motivo de aplicar un post-tratamiento aerobio de carácter simplificado radica en minimizar los costos de capital y operación asociados, esto como consecuencia de las restricciones presupuestarias asociadas al presente sistema de tratamiento para la ciudad. Nuevamente, se requerirán las cotizaciones pertinentes ante proveedores locales.

### Dimensionamiento del Proceso de Digestión y Generación de Energía

El proceso de biodigestor inicia con la mezcla que se introduce en el tanque, donde el residuo fresco tiene una relación 1 a 6 respecto al material de sustrato que se mezcla con éste para potenciar la generación de biogás en el biodigestor.

En el escenario RSU Mezclados, sale del proceso de trituración una cantidad de 7 toneladas durante doce horas, requiriéndose seis veces esta cantidad de material de sustrato que es la materia digerida del biodigestor que se mezcla con el material “fresco o de entrada” a través de un procesos sistematizado de homogenización y una cantidad de 0.2 toneladas de vapor por cada una de las toneladas de material fresco. En este caso para las 7 toneladas por hora de material fresco se necesitan 42 toneladas de sustrato y 0.14 toneladas de vapor, como se muestra en el siguiente cuadro

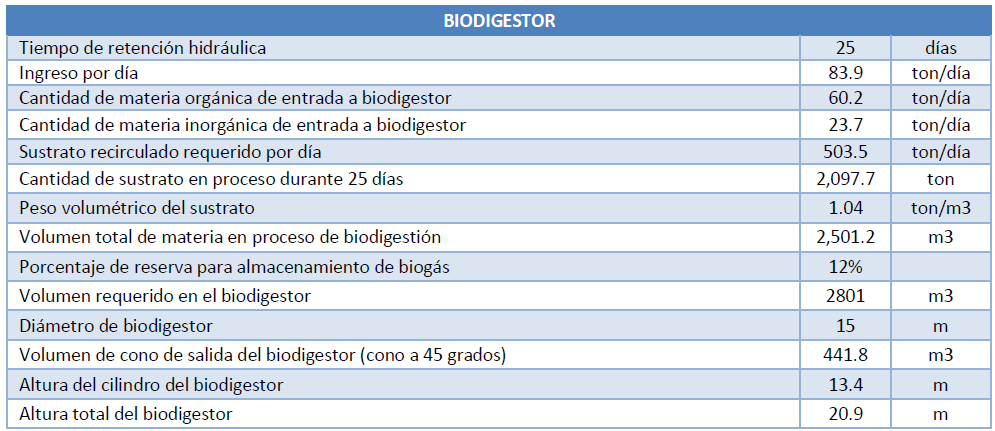
El tiempo de retención de la materia orgánica en el biodigestor es de 25 días y tiene un peso volumétrico de 1.04 ton/m3.

En el escenario RSU Mezclados, ingresan 60.2 toneladas diarias de material orgánico fresco y 23.7 de inorgánica (en total 83.9 toneladas diariamente). De acuerdo con la relación 1 a 6, se requieren 503.5 toneladas de sustrato por día (83.9 X 6 = 503.5). El material en proceso durante los 25 día es 2,097.7 toneladas (25 X 83.9 = 2,097.7). Entonces la cantidad de materia en el biodigestor es el sustrato recirculado que se requiere por día (503.5 toneladas) más el volumen total de sustrato en proceso durante 25 días (2,097.7), que en suma son 2,601.2 toneladas que tienen un volumen de2501.2 metros cúbicos (2,602.2 / 1.04 = 2,501.2 m3). Cabe destacar que está conversión de toneladas a metros cúbicos es para diseñar el volumen del biodigestor. A los 2,501.2 m3 obtenidos se suma un factor de seguridad del 12%. Entonces el volumen final de la capacidad del biodigestor será de 2,081 m3.

Tomando un radio de 15 metros y que el reactor en su base es cónica con ángulo de 45 grados y 7.5 metros de altura, ocupa esta figura geométrica (cono de 15 metros de diámetro y 7.5 metros de altura tiene una volumen de 441.8 m3. Sin embargo, dado que se requieren 2,801 m3, se necesita que el biodigestor en su parte cilíndrica ten una capacidad de 2,359.2 m3. Entonces la altura que cumple con este volumen es un cilindro de diámetro interior 15 metros y 13.4 de altura.

Los resultados se presentan en forma tabular en el siguiente cuadro.

Tabla 6 Dimensionamiento de Biodigestor (Escenario RSU Mezclados)..



El proceso de biodigestión produce 112 m3 de biogás por cada tonelada de materia orgánica con un poder calorífico por cada metro cúbico de biogás de 5.4 kwh. Bajo estas consideraciones en el escenario RSU Mezclados se producirán diariamente 36.4 Mwh, requiriéndose un gasómetro para regular la producción de biogás durante una hora de 281 m3.

En cuanto a la energía que se produce en el biodigestor por cada tonelada de materia orgánica son 260 kwh de energía térmica que generan 200 kwh de energía eléctrica.

En el escenario RSU Mezclados se producirán 15,680 kwh/día de energía térmica y 12,062 kwh/día de energía eléctrica.

En cuanto al balance de masa del biodigestor, se considera que los sólidos totales orgánicos son del orden del 40%, con un factor de producción de biogás del 61% y sólidos volátiles del 65%.

### Dimensionamiento del Post-Tratamiento

El post tratamiento considera la producción de composta para su aprovechamiento y/o venta, mediante camas simples con volteo mecánico. El diseño de dichas camas contará con un firme de concreto armado con malla electrosoldada y sistema de captación, conducción y almacenamiento de lixiviados en una laguna de evaporación. El tiempo de maduración de la composta comprenderá un lapso de 60 días, con un peso volumétrico promedio de 0.68 ton/m3, al término de este tiempo la composta se someterá a un proceso selectivo de cribado mediante un tromel de afine, el rechazo del afine será enviado a disposición final.

Las dimensiones de las camas son de 2.6 metros de ancho por 25 metros de largo. El cálculo del número de camas es función del volumen da salida del proceso del biodigestor donde la sección propuesta es de 3.06 m2 (trapecio de base mayor 2.58, base menor 1.5 y altura de 1.5 metros). En el caso del escenario RSU Mezclados se requieren 88 camas de acuerdo con los cálculos.

Finalmente se calcula la capacidad del tromel de afine de acuerdo con el balance de merma por la pérdida de volumen por descomposición que es del 35% y pérdida de humedad del 15% en función de la materia procesada en el biodigestor y la salida de producto para composta.

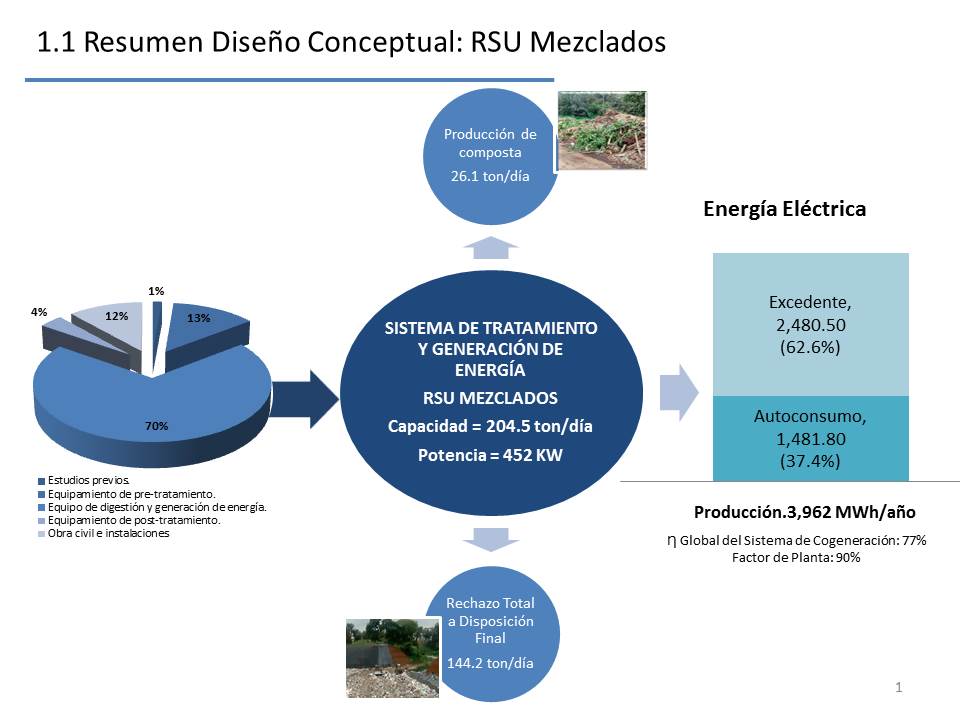
En el caso del escenario RSU Mezclados, se tendrían 38.2 toneladas después de mermas y se requerirá un tromel de afine de 8 m3 por hora para utilizarse durante una jornada de 8 horas.

### Sistema General y Arreglo General y Diagrama de Proceso

En el escenario RSU Mezclados los residuos orgánicos entrantes al biodigestor son 60.2 ton/día, inorgánicos 23.7 ton/día, vapor 1.68 ton/día, biogás producido 9.5 ton/día, donde al desarrollarse la reacción fisicoquímica en el biodigestor salen 52.3 ton/día de residuos orgánicos y la materia inorgánica de salida es de 23.7 toneladas al día, que en conjunto suman 76 toneladas diarias que se enviarán al proceso de maduración para la producción de composta

El balance de masa del sistema es el siguiente

Figura 5 Balance de masa de sistema propuesto



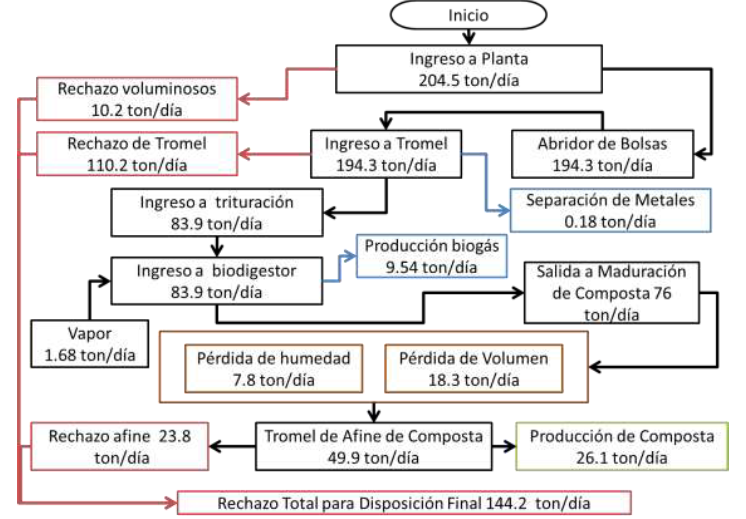
.

Tabla 7 Balance de Masa des Sistema de Biodigestión (Escenario RSU Mezclados).



Los arreglos generales se componen por instalaciones en obra civil y equipamiento como son cercado perimetral, caminos de operación, caseta de vigilancia, báscula, patios de maniobras, nave de recepción de RSU, nave de procesos, nave de afine de composta, cobertizo para maquinaria, franja de amortiguamiento arbórea, camas de maduración de composta, red de captación de lixiviados, laguna de almacenamiento y evaporación de lixiviados, oficina, baños y vestidores, cisterna, fosa séptica y pozo de adsorción, así como el equipamiento conformado por un abridor de bolsas, tromel de separación, trituradora, separación magnética, biodigestor y un tromel de afine de composta.

Figura 8 Diagrama de Procesos (Escenario RSU Mezclados).



El esquema mostrado representa el resumen de procesos y balance de masa de las fases del sistema de biodigestión con generación de energía eléctrica para el escenario RSU Mezclados.

Figura 9 Diagrama de Procesos Esquemático (Escenario RSU Mezclados).

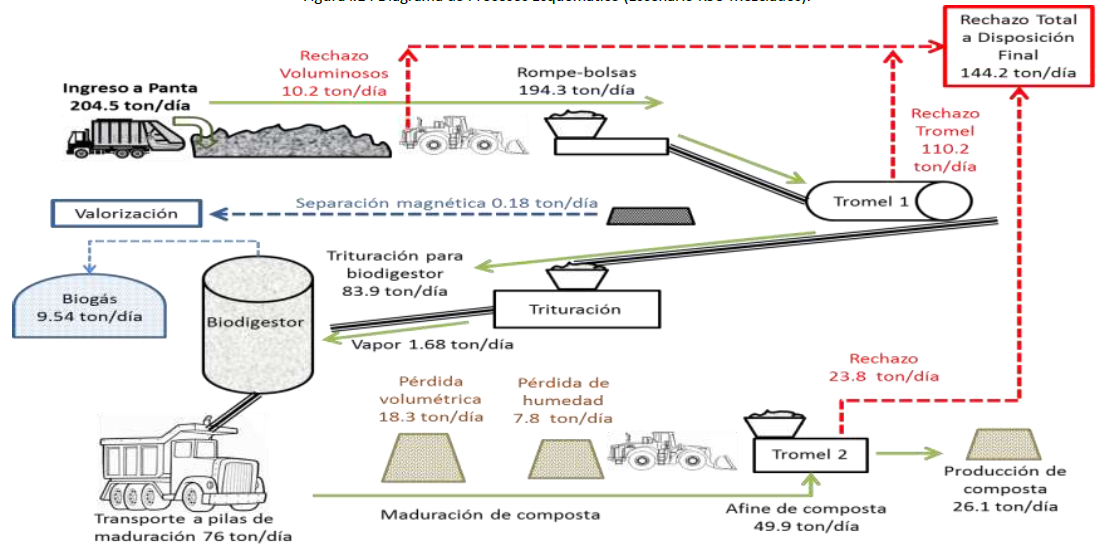
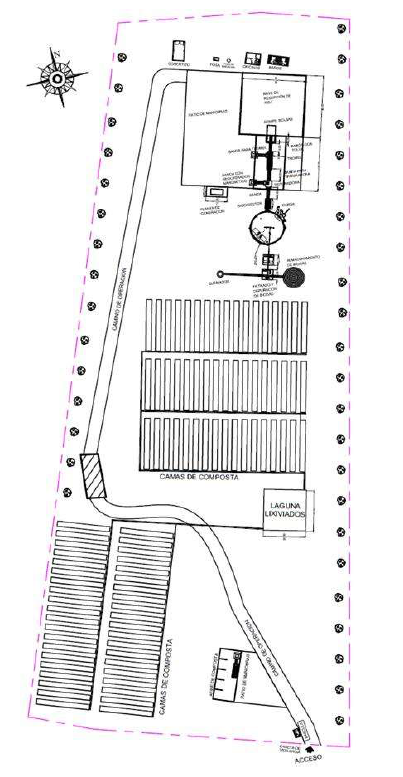


Figura 10 Arreglo General (Escenario RSU Mezclados).



### Costos

El costo total estimado es $7,999,628, USD, y se desglosa en:

* Estudios Previos: $115,067
* Equipamiento de Pre-Tratamiento: $1,051,153
* Equipo de Digestión y Generación de Energía: $5,606,438
* Equipamiento de Post-Tratamiento: $299,586
* Obra Civil e Instalaciones. $927,384

## Análisis de Beneficios y Factibilidad Técnica

### Aporte de Reducción de Emisiones

Respecto a las emisiones evitadas por el proyecto de Xalapa (período del evaluación de 11 años):

Emisiones directas evitadas: 36,641 ton CO2e = 156,493 ton CO2e (línea base por emisiones de metano evitadas) - 78,749 ton CO2e (emisiones del proyecto) - 41,102 ton CO2e (emisiones fugitivas)

Emisiones indirectas evitadas: 19,759 ton CO2e = 19,961 ton CO2e (generación de energía limpia) -202 ton CO2e (viajes adicionales de camiones de recolección)

Se calcularon bajo los siguientes procedimientos:

1. Emisiones directas: United Nations, Framework Convention on Climate Change, CDM-ACM0022: Large-scale Consolidated Methodology, Alternative Waste Treatment Processes, Version 02.0

2. Emisiones indirectas por generación de energía: Factor para el cálculo de emisiones indirectas por consumo de electricidad para el período 2015 publicado por la SEMARNAT.

3. Emisiones indirectas por viajes adicionales de camiones de recolección: Directrices del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. Volumen 2, Energía.

### Postergación de Inversiones en el Sitio de Disposición Final.

Al disminuir la cantidad de residuos sólidos que requieren confinarse, se incrementa la vida útil del lugar disponible con dicho fin, lo cual permite postergar inversiones para ampliación o construcción de nuevas celdas o sitios de disposición final.

El valor que se puede asignar a este beneficio corresponde al costo de oportunidad económica de los recursos, cuya erogación se posterga, considerando el tiempo que es posible retrasar la adquisición o ampliación de las celdas o el sitio de disposición final, ello como consecuencia directa de la reducción en la cantidad de desechos a confinar.

La proyección anualizada de la demanda del servicio de disposición final para la situación sin proyecto, se determinó asumiendo que el 90% de la generación total, obtenida tras multiplicar el número de habitantes por la generación percápita de residuos correspondiente, se confina efectivamente en el relleno sanitario. En el caso de la situación con proyecto, a la demanda calculada de la manera anteriormente descrita le fue sustraída la cantidad de residuos orgánicos valorizados anualmente por la planta, ello en función de los procesos diseñados exprofeso para los escenarios de residuos recolectados de forma mezclada o separada en origen.

Posteriormente, la comparación de la oferta acumulada del servicio disponible para satisfacer la demanda acumulada de las situaciones y escenarios estudiados, dio lugar a variaciones en las distribuciones de inversión a lo largo del horizonte de análisis. Estas variaciones pueden ser consideradas como los desplazamientos en las inversiones requeridas por la situación con proyecto al contrastarse con el caso sin proyecto, siendo consecuencia directa de la reducción en la demanda del servicio de disposición final provocada por la operación del sistema de tratamiento (ver tabla siguiente).

Tabla 8 Postergación de Inversiones y Vida Útil Adicional para los Escenarios RSU Mezclados y Separados.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | | **Situación Con Proyecto** | |
| **Infraestructura Para Disposición Final** | **Situación Sin Proyecto (Año)** | **Escenario RSU Mezclados (Año)** | | **Escenario RSU Separados (Año)** |
| Celda 1 | 2016 | 2016 | | 2016 |
| Celda 2 | 2017 | 2017 | | 2017 |
| Unión Celda 1 y Celda 2 | 2018 | 2018 | | 2018 |
| Celda 3 | 2019 | 2019 | | 2019 |
| Unión Celda 2 y Celda 3 | 2021 | 2022 | | 2022 |
| Celda Anexa 1 | 2022 | 2023 | | 2023 |
| Uniones con Celda Anexa 1 | 2027 | 2029 | | 2029 |
| Celda Anexa 2 | 2029 | No Requerida | | No Requerida |
| Vida Útil Adicional |  | 3 Años | | 3.1 Años |

### Generación de Energía.

La valoración de beneficios relacionados con la fase de digestión y generación de energía del sistema de tratamiento contempló las siguientes consideraciones:

Se obtuvo la generación de energía eléctrica de la planta para los escenarios de recolección mezclada y separada (3,962.3 MWh/año y 4,063.6 MWh/año respectivamente) a partir de los resultados presentados en el capítulo denominado “Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento” del Alcance Técnico de esta consultoría, los cuales consideran tanto las pérdidas por eficiencia del sistema de cogeneración, como la aplicación de un factor de planta del 90%[[1]](#footnote-1).

### Beneficio por Producción de Composta.

En el caso de la cuantificación de los impactos positivos relacionados con el producto resultante del post-tratamiento aplicado sobre la biomasa tras ser digerida por la planta, es posible señalar los siguientes supuestos:

La cantidad de composta generada en ton/día se obtuvo de los resultados presentados en el capítulo denominado “Dimensionamiento del Sistema de Tratamiento” del presente estudio (9,526.5 ton/año para el escenario con recolección mezclada de residuos y 9,709 ton/año en el caso del escenario asociado a la recolección de desechos separados en la fuente).[[2]](#footnote-2)

1. GIZ Cooperación Alemana en Chile, (2012). Guía de Planificación para Proyectos de Biogás en Chile y Renewable Waste Intelligence, (2013). Business Analysis of Anaerobic Digestion in the USA: Commercial Feasibility [↑](#footnote-ref-1)
2. Consultar específicamente los archivos: Diagrama Proceso RSU Mezclados y Diagrama Proceso RSU Separados. [↑](#footnote-ref-2)