

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE SISTEMA DE  
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
ORGÁNICOS EN UNA UNIDAD MINERA SUBTERRÁNEA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, que presentan los bachilleres:

**Daniela Elizabeth Hernani Astete  
Julio César Rodríguez Peña**

**ASESOR: Maribel Guzmán**

Lima, Noviembre de 2016



## RESUMEN DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto es realizar un análisis de costo – beneficio para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en una determinada unidad minera. Asimismo establecer los principales parámetros que influyen en el tratamiento de los residuos orgánicos para la obtención de biogás y compost.

El proyecto se desarrolla en una operación minera subterránea que genera alrededor de 1.35 toneladas de residuos sólidos orgánicos por día. El objetivo es aprovechar los residuos sólidos orgánicos generados en la unidad minera a través del tratamiento de estos para la obtención de biogás y compost.

El proceso de tratamiento de residuos sólidos orgánicos es muy complejo debido a la participación de diversos tipos de bacterias, las cuales se encargarán de convertir los residuos en energía renovable como el biogás y la biomasa. El proceso requiere diversas condiciones para su adecuado funcionamiento, para lo cual se analizará los factores fundamentales como la composición de los residuos, temperatura, pH del proceso, entre otros.

Se realizará el análisis costo – beneficio para el proyecto y se generalizará el estudio para que pueda ser aplicado en otras unidades mineras.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b> <b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2</b> <b>Antecedentes</b> .....	<b>1</b>
<b>1.3</b> <b>Justificación del Tema</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4</b> <b>Objetivos</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4.1.</b> <b>Objetivo General</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4.2.</b> <b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.</b> <b>Residuos Sólidos</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.1.</b> <b>Clasificación de Residuos Sólidos</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.2.</b> <b>Manejo de Residuos Sólidos</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2.</b> <b>Residuos Sólidos Orgánicos</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2.1.</b> <b>Clasificación de Residuos Sólidos Orgánicos</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2.2.</b> <b>Propiedades biológicas de los residuos sólidos orgánicos</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.3.</b> <b>Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.4.</b> <b>Estadísticas Residuos Sólidos Orgánicos</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3.</b> <b>Biogás</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3.1.</b> <b>Antecedentes</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3.2.</b> <b>Definición</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3.3.</b> <b>Fundamentos de la Producción de Biogás</b> .....	<b>12</b>
<b>2.3.4.</b> <b>Proceso de Digestión Anaeróbica</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3.5.</b> <b>Destino del Biogás</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.6.</b> <b>Destino de Subproductos del Biogás</b> .....	<b>24</b>

2.4.	Compostaje.....	25
2.4.1.	Propiedades del Compost.....	25
2.4.2.	Factores que condicionan el proceso de compostaje .....	26
<b>CAPÍTULO III: RESIDUOS SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA -</b>		
<b>PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS..... 28</b>		
3.1.	Residuos sólidos generados en el Perú.....	28
3.1.1.	Residuos Generados en Perú.....	28
3.1.2.	Residuos Generados en Lima .....	30
3.1.3.	Manejo de residuos sólidos de gestión municipal.....	31
3.1.4.	Manejo de residuos de gestión no municipal.....	32
3.2.	Residuos Generados en mina seleccionada .....	35
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS TÉCNICO DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS</b>		
<b>SÓLIDOS EN UNIDAD MINERA ..... 40</b>		
4.1	Datos Generales de la Unidad Minera.....	40
4.2	Estudio de Factibilidad Técnico Económico .....	40
4.2.1	Definición del Sustrato.....	41
4.2.2	Caracterización de los Sustratos.....	41
4.2.3	Modelos Matemático de estimación del Potencial Energético .....	46
4.3	Diseño de Planta de Biogás.....	54
4.3.1	Recepción, Pre Tratamiento y Manejo del Sustrato.....	55
4.3.2	Producción de Metano .....	58
4.4	Producción de Compost.....	70
4.4.1	Condiciones del área y localización .....	70
4.4.2	Procedimiento .....	71
4.4.3	Inconvenientes más frecuentes .....	78

<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS ECONÓMICO DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA UNIDAD MINERA .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1    Análisis de Costo-Beneficio para el biogás.....</b>	<b>79</b>
5.1.1 <b>Costos de Inversión Total .....</b>	<b>79</b>
5.1.2 <b>Análisis de la Propuesta 1 – Producción de Energía.....</b>	<b>80</b>
5.1.3 <b>Análisis de la Propuesta 2 – Quema de Metano.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2    Análisis de Costo y beneficio para el compost .....</b>	<b>85</b>
5.2.1 <b>Costo de Inversión .....</b>	<b>85</b>
5.2.2 <b>Beneficios.....</b>	<b>85</b>
<b>CAPÍTULO VI: PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PLANTA DE BIOGÁS EN OTRAS UNIDADES MINERAS .....</b>	<b>87</b>
<b>6.1.    Finalidad de la planta de biogás .....</b>	<b>87</b>
<b>6.2.    Características de los Residuos Sólidos Orgánicos .....</b>	<b>87</b>
6.2.1 <b>Cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos Generados.....</b>	<b>87</b>
6.2.2 <b>Potencial Energético.....</b>	<b>88</b>
6.2.3 <b>Composición del Sustrato.....</b>	<b>89</b>
<b>6.3.    Otros Factores .....</b>	<b>90</b>
6.3.1. <b>Cultura de segregación.....</b>	<b>90</b>
6.3.2. <b>Temperatura.....</b>	<b>90</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Clasificación de residuos sólidos orgánicos .....	8
Figura 2.2.- Proceso de digestión anaeróbico.....	16
Figura 2.3.- Dependencia del pH de la actividad metanogénica .....	17
Figura 2.4.- Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilos, mesófilos y termófilos.....	18
Figura 3.1.- Composición de Residuos Sólidos en el Perú, 2011 .....	28
Figura 3.2.- Exportación de Residuos del Perú, 2011 .....	29
Figura 3.3.- Destinos finales de la basura recolectada por las municipalidades.....	29
Figura 3.4.- Rellenos sanitarios y de seguridad en el Perú .....	30
Figura 3.5.- Residuos Sólidos en Lima en Estadísticas.....	30
Figura 3.6.- Residuos Sólidos Generado en Lima .....	31
Figura 3.7.- Porcentaje de Residuos Sólidos enviados a Rellenos Sanitarios.....	31
Figura 3.8.- Manejo de residuos sólidos de gestión municipal .....	32
Figura 3.9.- Gestión Integral de Residuos Sólidos.....	33
Figura 3.10.- Porcentaje de cumplimiento de las EFA respecto a la gestión de residuos sólidos a nivel nacional .....	34
Figura 3.11.- Evaluación de la gestión y manejo de residuos sólidos municipales a nivel nacional.....	34
Figura 3.12.- Ranking de cumplimiento en la gestión y manejo de residuos sólidos a nivel de capital de región .....	35
Figura 3.13.- Variación de los valores de densidad de los residuos en general.....	36
Figura 3.14.- Composición de residuos sólidos .....	37
Figura 3.15.- Composición física de la fracción orgánica de los residuos sólidos ...	38
Figura 3.16.- Composición física de los residuos inorgánicos.....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Composición Porcentual (%) de Residuos Municipales en Países.....	10
Tabla 2.2.- Características Generales del Biogás.....	12
Tabla 2.3.- Clasificación de Sustratos .....	19
Tabla 2.4.- Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico.....	23
Tabla 2.5.- Variación de la temperatura durante el proceso de compostaje .....	26
Tabla 2.6.- Variación del pH durante el proceso de compostaje .....	26
Tabla 2.7.- Relación de C/N de algunos materiales.....	27
Tabla 3.1.- Composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos .....	36
Tabla 3.2.- Composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos .....	38
Tabla 3.3.- Composición de la fracción inorgánica de los residuos sólidos .....	38
Tabla 4.1.- Cálculo de Generación Per Cápita (GPC) de residuos sólidos.....	42
Tabla 4.2.- Cálculo de Generación por Punto de Acopio de residuos sólidos .....	42
Tabla N° 4.3.- Densidad general promedio de los residuos sólidos.....	42
Tabla 4.4.- Densidad promedio del componente orgánico .....	43
Tabla 4.5.- Composición física de los residuos sólidos .....	44
Tabla 4.6.- Composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos .....	46
Tabla 4.7.- Características fisicoquímicas por tipo de sustratos evaluados.....	49
Tabla 4.8.- Fracción de Carbono orgánico Biodegradable de residuos frescos .....	50
Tabla 4.9.- Fracción de Carbono orgánico Biodegradable de residuos cocido.....	50
Tabla 4.10.- Fracción de Carbono orgánico Biodegradable para residuos mezclados .....	51
Tabla 4.11.- Fracción de Carbono orgánico biodegradable como Metano .....	51
Tabla 4.12.- Fracción Orgánica biodegradable .....	51
Tabla 4.13.- Potencial Energético de residuos frescos.....	52
Tabla 4.14.- Potencial Energético de residuos cocidos .....	52
Tabla 4.15.- Potencial Energético de residuos mezclados .....	52
Tabla 4.16.- Valores de Conversión Energética .....	53
Tabla 4.17.- Equivalencia Energética de los sustratos frescos, cocidos y mezcla ..	53
Tabla 4.18.- Equivalencia energética de los residuos de comida (S2).....	54
Tabla 4.19.- Valores de pH en las etapas de la biodigestión.....	59
Tabla 4.20.- Volumen de la cámara de digestión.....	59
Tabla 4.21.- Volumen requerido por biodigestor .....	60
Tabla 4.22.- Composición del sustrato ingresante a cada cámara de digestión.....	60
Tabla 4.23.- Volúmenes de arranque para cada biodigestor.....	61

Tabla 4.24.- Especificaciones técnicas por biodigestor (reactor) .....	62
Tabla 4.25.- Especificaciones técnicas del reservorio de biol .....	62
Tabla 4.26.- Especificaciones técnicas de la poza de entrada.....	62
Tabla 4.27.- Especificaciones técnicas de la cámara de almacenamiento .....	63
Tabla 4.28.- Especificaciones técnicas de la picadora .....	63
Tabla 4.29.- Especificaciones técnicas de la terma solar .....	64
Tabla 4.30.- Características del sistema mesófilo vs termófilo.....	64
Tabla 4.31.- Parámetros del proceso de la biodigestión.....	66
Tabla 4.32.- Características del ingreso del sustrato diluido .....	66
Tabla 4.33.- Inhibidores de la producción de biogás .....	69
Tabla 4.34.- Consideraciones de la recolección de residuos sólidos orgánicos .....	71
Tabla 4.35.- Consideraciones para la trituración de residuos.....	72
Tabla 4.36.- Dimensiones de la pila de compostaje .....	72
Tabla 4.37.- Volumen de residuos generados .....	72
Tabla 4.38.- Resultados de análisis realizados.....	74
Tabla 4.39.- Relación C/N de algunos materiales.....	74
Tabla 4.40.- Resultados de humedad de residuos frescos.....	74
Tabla 4.41.- Consideraciones para el control de humedad .....	75
Tabla 4.42.- Variación de la temperatura durante el proceso de compostaje.....	75
Tabla 4.43.- Consideraciones para el control de la temperatura.....	76
Tabla 4.44.- Variación de la temperatura durante el proceso de compostaje.....	76
Tabla 4.45.- Consideraciones para el control del pH .....	77
Tabla 4.46.- Consideraciones para el control de la conductividad .....	77
Tabla 4.47.- Problemas más usuales en el compostaje, efecto, causas.....	78
Tabla 5.1.- Especificaciones técnicas del motor .....	80
Tabla 5.2.- Costo de inversión total para la construcción de la planta de producción de biogás.....	80
Tabla 5.3.- Costo de recuperación de inversión – Propuesta 1.....	82
Tabla 5.4.- Especificaciones Técnicas del quemador atmosférico.....	83
Tabla 5.5.-: Costo de inversión total para la construcción de la planta de quemado de metano .....	83
Tabla 5.6.- Costo de recuperación de inversión – Propuesta 2.....	84
Tabla 5.7.- Costo de equipos para la mejora y control del proceso de compostaje .....	85
Tabla 5.8.- Problemas más usuales en el compostaje, efecto, causas y soluciones .....	86
Tabla 6.1.- Potencial Energético según tipo de Sustrato.....	89

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Variación de los valores de densidad de los residuos en general.....	43
Gráfico 4.2.- Variación de los valores de densidad del componente orgánico .....	44
Gráfico 4.3.- Composición de residuos sólidos .....	45
Gráfico 4.4.- Composición física de la fracción orgánica de los residuos sólidos... ..	46
Gráfico 4.5.- Principales parámetros químicos por sustratos analizados.....	50
Gráfico 4.6.- Potencial Energético de los residuos sólidos orgánicos .....	53
Gráfico 4.7.- Almacenamiento de residuos orgánicos por colores de bolsa .....	55
Gráfico 4.8.- Almacenamiento de residuos inorgánicos .....	56
Gráfico 4.9.- Almacenamiento de residuos generales .....	56
Gráfico 4.10.- Trampa de óxido de hierro .....	68
Gráfico 4.11.- Distribución de pilas de compostaje.....	73
Gráfico 4.12.- Sistema de volteo de pilas.....	73



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

La unidad minera seleccionada se localiza en el sur del Lima, actualmente son 2,354 trabajadores aproximadamente, entre servidores de la empresa minera y de las empresas contratistas, los cuales prestan servicios en las diferentes etapas de la operación: en la extracción de mineral, mantenimiento de áreas, mejora de infraestructura, entre otros. El régimen laboral de los trabajadores en la unidad minera es variable, siendo de 5 por 2, 10 por 4 y 14 por 7. La unidad minera cuenta con infraestructura que presta los servicios básicos, módulo de comedores, viviendas, posta médica, área de recreación. Asimismo, cuenta con infraestructura para la extracción, procesamiento de mineral e infraestructura para disposición de relaves filtrados, almacenamiento y disposición de residuos sólidos.

La unidad minera cuenta con seis comedores y dos zonas de cocina, de la actividad se generan residuos orgánicos como restos de comida cocida, verdura y carne, así como residuos inorgánicos entre ellos bolsas plásticas, botellas de polietileno, latas, entre otros. Se ha estimado que los residuos orgánicos generados son aproximadamente 1.35 ton/día.

La unidad minera genera residuos orgánicos con potencial de aprovechamiento energético a partir del biogás, que actualmente no está siendo utilizado estratégicamente. Los residuos orgánicos provenientes de los puntos de acopio de los comedores serán tratados por biodigestión anaeróbica para obtención de biogás, estableciendo una fuente alternativa de energía, con lo cual, se reduciría la disposición de residuos orgánicos en el micro-relleno sanitario, permitiendo de este modo prolongar la vida útil de este componente.

### 1.2 Antecedentes

Los residuos sólidos siempre han estado ligados a toda actividad humana; en la actualidad estos residuos representan un problema crítico debido al incremento en la velocidad de su generación. Muchos factores pueden estar asociados a este problema como el crecimiento demográfico y por lo tanto una mayor demanda de materiales; otro factor es la composición de estos residuos, en vista que cada vez se incrementa la cantidad de residuos inorgánicos, los cuales no se descomponen

naturalmente impidiendo su ciclo natural en el planeta. En este contexto, se ha desarrollado procesos y tecnologías para una adecuada gestión de residuos sólidos en todo el mundo. Existen países líderes en el reciclaje de residuos como Suecia donde se recicla más del 99% de los residuos domésticos (Sverige 2015); sin embargo para los países en vías de desarrollo, como el Perú, implementar una adecuada gestión de residuos sólidos representa un reto y desafío para la presente generación.

En el Perú, se ha establecido normas como la Ley General de Residuos Sólidos (Ley N° 27314) con la finalidad de establecer criterios, lineamientos, obligaciones y responsabilidades para ejecutar una adecuada gestión de residuos sólidos en el país a través de principios de minimización en la generación de residuos, prevención de riesgos ambientales y protección a la salud.

Por otro lado, los residuos producto de la actividad minera están clasificados como residuos de ámbito no municipal, por lo cual su gestión o manejo de estos son responsabilidad de las empresas mineras, las cuales debe contar con un plan de manejo de ambiental que incluya el manejo de residuos sólidos industriales (desmonte, relave, entre otros) y manejo de residuos domésticos, principalmente generados por los campamentos mineros, comedores, entre otros.

### **1.3 Justificación del Tema**

Actualmente, la unidad minera seleccionada realiza el tratamiento de residuos sólidos orgánicos a través de un proceso de compostaje; aproximadamente el 23% de los residuos orgánicos generados son tratados por este método. La cantidad restante es dispuesta en el micro-relleno sanitario, sin embargo, el sistema adoptado no cumple las expectativas esperadas, existiendo presencia de malos olores y vectores en el área del micro-relleno; así como la reducción de la vida útil de este componente por la mayor cantidad de residuos depositados.

En esto contexto, el presente estudio tiene por objeto analizar la factibilidad técnico-económica de implementar un sistema de aprovechamiento de residuos domésticos orgánicos en la unidad minera, principalmente a través del tratamiento de estos para la producción de biogás y compost. Asimismo, se determinará las variables o factores generales para aplicar este sistema en otras unidades mineras.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1. Objetivo General

El objetivo principal es realizar un análisis de costo – beneficio para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en una determinada unidad minera. Asimismo establecer los principales parámetros que influyen en el tratamiento de los residuos orgánicos para la obtención de biogás y compost.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Establecer el marco contextual de residuos sólidos en el país y en la industria minera.
- Definir los procesos de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos para aprovechamiento energético.
- Analizar los factores que influyen en el proceso de obtención de biogás y compost.
- Realizar el análisis de costo beneficio para el proyecto.
- Generalizar el estudio para otras empresas mineras, estableciendo los requisitos mínimos para la implementación del sistema de generación de biogás y compost como alternativa para el aprovechamiento eficiente de residuos sólidos orgánicos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Residuos Sólidos

“Los residuos sólidos son sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido, desechados por su generador. Se entiende por generador a aquella persona que en razón de sus actividades produce residuos sólidos. Suelen considerarse que carecen de valor económico y se les conoce coloquialmente como basura.” (OEFA 2014b: 8).

##### 2.1.1. Clasificación de Residuos Sólidos

En función a su manejo y gestión:

- Residuos de Gestión Municipal: son aquellos residuos de origen doméstico (restos de alimentos, papel, botellas, latas, etc.); comercial (papel, embalajes, restos de aseo personal y similares); limpieza urbana (barrido de calles y vías, maleza, entre otros); y de productos provenientes de actividades que generen residuos similares a estos, cuya gestión ha sido encomendada a las municipalidades. La disposición final de residuos del ámbito de gestión municipal se realiza mediante el método de relleno sanitario (OEFA 2014a: 9).
- Residuos de Gestión No Municipal: son aquellos que, debido a sus características o al manejo al que deben ser sometidos, representan un riesgo significativo para la salud o el ambiente por presentar al menos una de las siguientes características: auto-combustibilidad, explosividad, corrosividad, reactividad, toxicidad, radiactividad o patogenicidad. Por ejemplo, los residuos metálicos que contengan plomo o mercurio, los residuos humanos provenientes de establecimientos de salud, los residuos de plaguicidas, los herbicidas, los residuos provenientes de la fabricación de productos químicos, los residuos con cianuro, entre otros indicados en el Anexo 4 del Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos. Cada uno de ellos debe ser dispuesto en los rellenos de seguridad (OEFA 2014a: 9).

En función a su origen:

- Residuo domiciliario: son aquellos residuos generados en las actividades domésticas realizadas en los domicilios, constituidos por restos de alimentos, periódicos, revistas, botellas, embalajes, latas, cartón y otros similares (OEFA 2014a: 10).

- Residuo comercial: son aquellos residuos generados durante el desarrollo de actividades comerciales de bienes y servicios tales como centros de abasto de alimentos, restaurantes, supermercados, tiendas, bares, bancos, entre otros. Estos residuos principalmente están constituidos por papel, plásticos, embalajes, latas, etc. (OEFA 2014a: 11).
- Residuo de limpieza de espacios públicos: son aquellos residuos generados por el barrido y limpieza de calles, pistas, veredas, plazas, parques y otros espacios públicos (OEFA 2014a: 11).
- Residuo de establecimiento de atención de salud y centros médicos de apoyo: son aquellos residuos generados en las actividades para la atención e investigación médica, en establecimientos como hospitales, clínicas, centros y puestos de salud, laboratorios clínicos, consultorios y otros similares (OEFA 2014a: 12).
- Residuo industrial: son aquellos residuos generados en las actividades de las diversas ramas industriales, tales como: manufacturera, minera, química, energética, pesquera y otras similares. Estos residuos se presentan como: lodos, cenizas, escorias metálicas, vidrios, plásticos, papel, cartón, madera, fibras, que generalmente se encuentran mezclados con sustancias alcalinas o ácidas, aceites pesados, entre otros, incluyendo en general los residuos considerados peligrosos (OEFA 2014a: 12).
- Residuo de las actividades de construcción: son aquellos residuos fundamentalmente inertes que son generados en las actividades de construcción y demolición de obras, tales como: edificios, puentes, carreteras, represas, canales y otras afines a éstas (OEFA 2014a: 12).
- Residuo agropecuario: son aquellos residuos generados en el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias. Estos residuos incluyen los envases de fertilizantes, plaguicidas, agroquímicos diversos, entre otros (OEFA 2014a: 12).
- Residuo de instalaciones o actividades especiales: son aquellos residuos generados en infraestructuras, generalmente de gran dimensión, complejidad y de riesgo en su operación; con la finalidad de prestar ciertos espacios públicos o privados tales como plantas de tratamiento de agua, puertos, aeropuertos, terminales terrestres, instalaciones navieras y militares, entre otras; o de aquellas actividades públicas o privadas que movilizan recursos humanos, equipos o infraestructuras, en forma eventual como conciertos musicales, campañas u otras similares (OEFA 2014a: 13).

En función a su naturaleza:

- Residuo Inorgánico: residuos de origen mineral o producidos industrialmente que no se degradan con facilidad. Pueden ser reaprovechados mediante procesos de reciclaje (OEFA 2014a: 14).
- Residuos Orgánico: Los residuos sólidos orgánicos son aquellos residuos de origen biológico (vegetal o animal), que se descomponen naturalmente, generando gases (dióxido de carbono, metano, entre otros) y lixiviados en los lugares de tratamiento y disposición final. Por ejemplo: se tiene Pueden ser reaprovechados como mejoradores de suelo y fertilizantes (OEFA 2014a: 14).

En función a su peligrosidad:

- Residuo Peligroso: aquellos residuos que por sus características intrínsecas (corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosa) representan un riesgo significativo a la salud y al medio ambiente. Los residuos químicos son principalmente el mayor aporte de los residuos sólidos peligrosos, los residuos de los hospitales están considerados como residuos biológico-infecciosos (DIGESA 2006: 15).
- Residuo No Peligroso: aquellos residuos que no representan riesgo significativo a la salud o al medio ambiente.

### **2.1.2. Manejo de Residuos Sólidos**

Una adecuada gestión o manejo de residuos sólidos es muy importante para la protección del medio ambiente; los residuos sólidos pueden ser reaprovechados de diversas formas. Se ha desarrollado y se viene desarrollando tecnologías con esta finalidad, no solo con la intención de protección del medio ambiente sino también con fines lucrativos.

El manejo de residuos sólidos considera las siguientes etapas:

- Generación: etapa que se genera, forma o produce los residuos sólidos, se considera que las sustancias, productos o subproductos ya no tienen valor, por lo cual son desechados.
- Segregación en fuente: consiste en la agrupación de los residuos según características similares que permiten optimizar el aprovechamiento de estos residuos. La etapa de segregación es la etapa clave para una adecuada gestión de residuos sólidos.

Principalmente se tiene los siguientes grupos de segregación:

- Orgánicos como restos de alimentos de origen animal o vegetal.
  - Papeles y cartones.
  - Plásticos como bolsas, botellas.
  - Metales como chatarras, alambres, calvos.
  - Vidrios.
  - Peligrosos como pilas, baterías.
  - Generales.
- Almacenamiento: es la disposición temporal de los residuos en un ambiente que preste las condiciones necesarias de protección a la salud y al medio ambiente.
  - Comercialización de residuos sólidos: acción de compra y venta de residuos previamente clasificados, los residuos poseen valor económico que son aprovechados por algunas empresas del mercado.
  - Recolección y transporte: etapa en la que se recoge los residuos sólidos y se trasladan a lugares destinada al acopio para su posterior manejo.
  - Transferencia: consisten en el traslado de los residuos del lugar de almacenamiento temporal hacia el lugar para su tratamiento o disposición final.
  - Tratamiento: proceso en el cual se modifica las características de los residuos sólidos con la finalidad de reducir el potencial peligro de causar daño a la salud o al medio ambiente.
  - Disposición final: etapa final del proceso en la cual los residuos son colocados en un lugar de forma permanente, el cual ha sido acondicionado para prevenir cualquier daño o impacto ambiental. La disposición final de los residuos de gestión municipal se da a través de los rellenos sanitarios; mientras que los residuos de gestión no municipal a través de los rellenos de seguridad.

## **2.2. Residuos Sólidos Orgánicos**

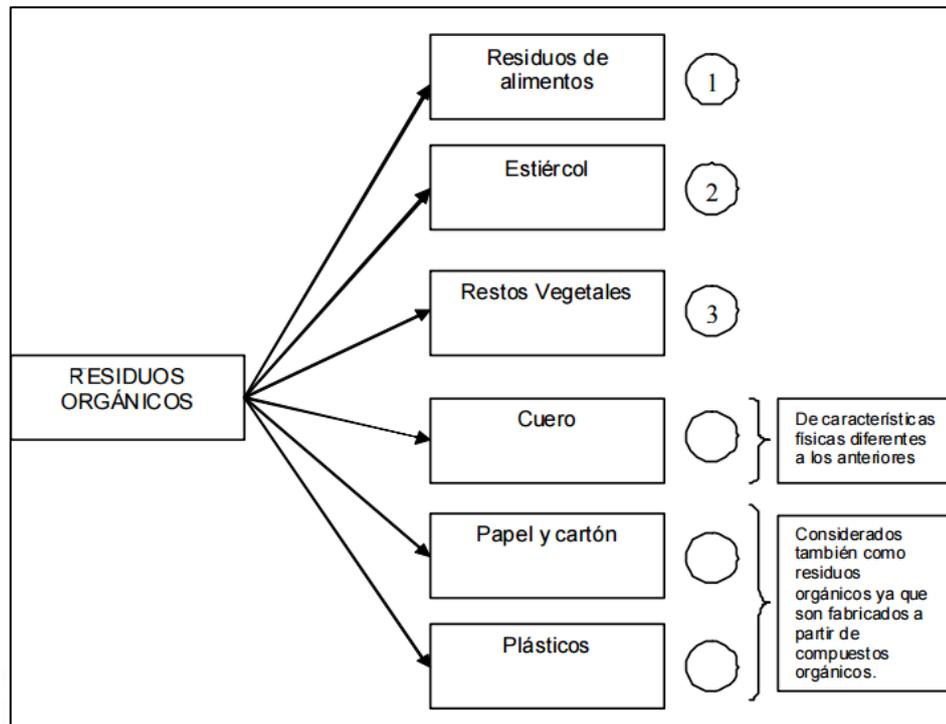
### **2.2.1. Clasificación de Residuos Sólidos Orgánicos**

Los residuos sólidos orgánicos pueden sub-clasificarse, según su naturaleza o característica física en: (ver figura 2.1)

- Residuos de alimentos: provienen de diversas fuentes como restaurantes. Comedores, hogares y otros establecimientos de venta de alimentos.
- Estiércol: son residuos fecales de animales (ganado), son aprovechados para la generación de biogás.
- Restos vegetales: provenientes de podas, son considerados también residuos de cocina que no han pasado procesos de cocción.

- Papel y cartón, residuos con un gran potencial de reciclaje.
- Cuero: derivados en su mayoría por cuero en desuso.
- Plásticos: considerados como residuos de origen orgánico.

Figura 2.1.- Clasificación de residuos sólidos orgánicos (Matute 2014: 10)



### 2.2.2. Propiedades biológicas de los residuos sólidos orgánicos

Excluyendo el plástico, la goma y el cuero, la fracción orgánica de la mayoría de los residuos se puede clasificar como hemicelulosa, celulosa, grasas, aceites y ceras, lignina, lignocelulosa y proteínas. La característica más importante de los residuos, es que casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos relativamente inertes. La producción de olores y la generación de moscas están relacionadas también con la naturaleza putrefactible de los materiales orgánicos encontrados en este tipo de residuos (por ejemplo: los residuos de comida) (Jaramillo 2008: 30).

### 2.2.3. Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos

En la actualidad, debido a la problemática del calentamiento global en el planeta Tierra se buscan las soluciones o caminos para disminuir este problema que viene afectando a la humanidad.

Es por ello que se viene incrementando y enfocando la manera de manejar los residuos que generamos día a día de una manera más eficiente y al mismo tiempo generar energías sustentables y que afecten menos al medio ambiente.

Los residuos sólidos orgánicos pueden tener varias formas de tratamiento para su aprovechamiento. Se puede obtener energía renovable como el biogás, puede ser aprovechado como abono y compostaje; generación de energía por a través de la incineración, alimento para animales, entre otros. Las diversas formas de tratamiento y aprovechamiento deben ser sometidas a un análisis de costo beneficio para identificar la forma de aprovechamiento más eficiente (Jaramillo 2008: 34-35).

#### **2.2.4. Estadísticas Residuos Sólidos Orgánicos**

La organización de alimentos y agricultura de las Naciones Unidas (FAO) estima que el 33% de la comida producida en el mundo se ha perdido o desperdiciado en el 2009 mientras que 870 millones de personas se reportan como crónicamente desnutridos. Esta cantidad equivale aproximadamente 1.3 billones de toneladas por año, es decir, un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano, se pierde a nivel mundial. (FAO 2011: 4) En Estados Unidos se generan casi 61 millones de toneladas de los residuos de alimentos cada año (FAO 2011: 5).

En Australia se reportó una tasa de generación de residuos de alimentos de 4 millones de toneladas por año. Otros datos indican que la generación de residuos en Corea del Sur es de 6.24 millones de toneladas por año, en China fue de 92.4 millones de toneladas por año y Japón se generó alrededor de 21 millones de toneladas de residuos de alimentos en el 2010 (FAO 2011: 5-6). Por otro lado, en Europa se estima que la generación de residuos ha sido de 90 millones de toneladas anuales (FAO 2011: 5-6).

Algunos países realizan tratamientos a los residuos de alimentos, los cuales son denominados residuos orgánicos, con el fin de transformarlos en nuevos recursos útiles para el hombre, logrando así el máximo aprovechamiento de estos. A continuación, mencionaremos los países que reaprovechan sus residuos orgánicos generados.

En Polonia emplean los residuos alimenticios para la generación de biogás, también hacen uso de lodos de las plantas de tratamientos de aguas residuales y los residuos

municipales (vertederos de residuos). La construcción de las primeras plantas de tratamiento de biogás data desde antes de dar inicio a la Segunda Guerra Mundial. Por otro lado, la segregación de residuos ha sido recientemente incorporada en Polonia; los residuos municipales se envían a vertederos en donde se libera el metano para su posterior uso (Bartłomiej 2015: 687-690).

*Tabla 2.1.- Composición Porcentual (%) de Residuos Municipales en Diversos Países (Acuario 1997: 46, cuadro 3.2.5)*

País	Cartón y papel	Metal	Vidrio	Textiles	Plásticos	Orgánicos	Otros e inertes
<b>Brasil</b>	25,0	4,0	3,0	-	3,0	-	65,0
<b>México</b>	20,0	3,2	8,2	4,2	6,1	43,0	27,1
<b>Costa Rica</b>	19,0	-	2,0	-	11,0	58,0	10,0
<b>El Salvador</b>	18,0	0,8	0,8	4,2	6,1	43,0	27,1
<b>Perú</b>	10,0	2,1	1,3	1,4	3,2	50,0	32,0
<b>Chile</b>	18,8	2,3	1,6	4,3	10,3	49,3	13,4
<b>Guatemala</b>	13,9	1,8	3,2	3,6	8,1	63,3	6,1
<b>Colombia</b>	18,3	1,6	4,6	3,8	14,2	52,3	5,2
<b>Uruguay</b>	8,0	7,0	4,0	-	13,0	56,0	12,0
<b>Bolivia</b>	6,2	2,3	3,5	3,4	4,3	59,5	20,8
<b>Ecuador</b>	10,5	1,6	2,2	-	4,5	71,4	9,8
<b>Paraguay</b>	10,2	1,3	3,5	1,2	4,2	56,6	23,0
<b>Argentina</b>	20,3	3,9	8,1	5,5	8,2	53,2	0,8
<b>Trinidad &amp; Tobago</b>	20,0	10,0	10,0	7,0	20,0	27,0	6,0

En Holanda, con la finalidad de disminuir espacio en la construcción de rellenos sanitarios han buscado reducir, reciclar y reusar sus residuos. Los residuos sólidos orgánicos son empleados para la generación de gas que se usa como combustible en los camiones de recolección de basura.

En Suecia el 99% de los residuos sólidos domésticos se recicla, los residuos sólidos orgánicos son transformados en energía para el país. Pero lo llamativo es que el programa de reducir los residuos ha sido tan efectivo que necesitan importar residuos de otros países como Reino Unido, Italia, noruega e Irlanda para abastecer sus centros generadores de energía WTE (Silva 2014).

España realiza dos procesos de tratamiento de residuos orgánicos: el proceso de biometanización que consta en la generación de metano para la obtención de energía y el proceso de compostaje que se emplea como fertilizante. De igual manera Korea y Guatemala hacen uso de los residuos orgánicos para la generación de compostaje para la industria ganadera (Comunidad de Madrid s/f: 16-18).

En el caso de Perú, existe un caso resaltante de un proyecto desarrollado en Puno, en la localidad de “Calca” en la cual consistió en aprovechar los residuos orgánicos generados y otros mediante la implementación de una Planta de Compostaje y Relleno Sanitario Manual, de esta manera se abasteció a la comunidad con compostaje y se logró reducir 360 toneladas de CO<sub>2</sub> por año con una inversión de 0.2 millones de dólares (Municipalidad Provincial de Calca 2013: 23-26).

Así mismo, en el 2014 se realizó un estudio de caso para un modelo de ciudad saludable en Perú, con la finalidad de contribuir a la gestión ambiental sostenible de las ciudades por medio de sistemas de gestión de residuos sólidos con la finalidad de crear una cultura de uso de residuos; posteriormente estos avances podrán desarrollar nuevos proyectos como la generación de nuevos recursos a partir de residuos como la energía (Lumbreras 2014: 20-25).

## **2.3. Biogás**

### **2.3.1. Antecedentes**

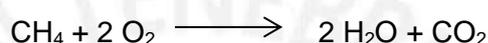
El biogás es una fuente de energía renovable, que inicialmente alcanzó alto grado de importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Asimismo, países como India y China fueron pioneros en el establecimiento de políticas y programas para la obtención de biogás a partir del tratamiento de materia orgánica. En la actualidad, la producción de biogás está ligada al requerimiento energético y a la responsabilidad ambiental; de acuerdo a estos dos requerimientos otros países han implementado este tipo de sistemas (Varnero 2011: 9)

### **2.3.2. Definición**

“El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el

biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable.” (Varnero 2011: 16).

El biogás es una fuente de energía, cuyo componente principal es el metano (CH<sub>4</sub>), el cual es el primer hidrocarburo de la serie de los alcanos y un gas de efecto invernadero. El metano es mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, como estiércol y residuos orgánicos. El metano se convierte en un combustible ecológico, ya que se obtiene mediante procesos naturales o también se puede generar controladamente mediante biodigestores por fermentación anaeróbica de residuos orgánicos o estiércol de herbívoros. (Varnero 2011: 16-17)



En la fórmula se observa la combustión del biogás en la cual al reaccionar con el oxígeno se produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua; el CO<sub>2</sub> sale a la atmósfera, de donde es captado por las plantas que servirán de alimento a los herbívoros, que los utilizarán para su crecimiento; estas plantas servirán de alimento a los herbívoros, cuyo estiércol servirá para alimentar a los digestores, convirtiéndose en un proceso continuo en el que se completa el ciclo del CO y es un proceso que disminuye la emisión del gas invernadero al medio ambiente.

*Tabla 2.2.- Características Generales del Biogás (Deublein 2008: 443)*

<b>Composición</b>	55 – 70% metano (CH <sub>4</sub> ) 30 – 45% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
<b>Contenido energético</b>	6.0 – 6.5 kW h m <sup>-3</sup>
<b>Equivalente de combustible</b>	0.60 – 0.65 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás
<b>Límite de explosión</b>	6 – 12 % de biogás en el aire
<b>Temperatura de ignición</b>	650 – 750°C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
<b>Presión crítica</b>	74 – 88 atm
<b>Temperatura crítica</b>	-82.5°C
<b>Densidad normal</b>	1.2 kg m <sup>-3</sup>
<b>Olor</b>	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
<b>Masa molar</b>	16.043 kg kmol <sup>-1</sup>

### 2.3.3. Fundamentos de la Producción de Biogás

Los residuos sólidos orgánicos pueden ser tratados a través de 2 procesos de digestión: aeróbica y anaeróbica. La biodigestión anaeróbica permite la generación

de metano, principal componente del biogás. El proceso de biodigestión aeróbica sólo genera biomasa, por lo que no se puede generar biogás por este proceso.

- Digestión aeróbica: “La digestión aeróbica consiste en procesos realizados por diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos que, en presencia de oxígeno actúan sobre la materia orgánica disuelta, transformándola en productos finales inocuos y materia celular. La digestión aeróbica es un proceso mediante el cual los lodos son sometidos a una aireación prolongada en un tanque separado y descubierto. El proceso involucra la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la auto oxidación de la materia celular.” (Varnero 2011:13).

Las principales ventajas del proceso de digestión aeróbica es la simplicidad de operación del sistema, bajo capital de inversión, reducción de cantidad de coliformes fecales y organismos patógenos y no genera malos olores. Mientras que las principales desventajas son los altos costos de operación por el alto consumo de energía, falta de parámetros claros para el diseño y dificultad para la separación de lodos.

- Digestión anaeróbica: “La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos orgánicos) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (p. ej. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.” (Varnero 2011:14)

El proceso de digestión anaeróbica es una tecnología madura y ampliamente desarrollada para lograr el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y obtener los siguientes productos: biogás rico en metano (concentraciones mayores al 60%) y bioabono. Sin embargo, el biogás generado por este proceso suele estar contaminado con otros componentes.

En conclusión, la materia orgánica puede ser tratada a través de la digestión aeróbica y anaeróbica. La digestión aeróbica se realiza a través de bacterias que requieren oxígeno y el producto final es biomasa. La digestión anaeróbica se realiza a través de bacterias que no requieren oxígeno y el producto final es biogás. La siguiente sección explicará el proceso de digestión anaeróbica de manera más específica.

#### **2.3.4. Proceso de Digestión Anaeróbica**

La digestión anaeróbica es un proceso complejo debido a la cantidad de reacciones bioquímicas y a los microorganismos empleados para desarrollar el proceso. El proceso se lleva a cabo en digestores y se emplean diversos tipos de bacterias que realizan diferentes trabajos.

Las bacterias son organismos unicelulares rodeados por una membrana, que segregan químicos denominados “enzimas” a través de la membrana en la comida alrededor de estas; con la finalidad de transformarla en sustancias más simples. Estas sustancias se disuelven en agua y pueden ser absorbidas y utilizadas por las bacterias. Las bacterias utilizadas en la digestión anaeróbica se caracterizan por no tener una funcionalidad total en presencia de oxígeno (éstas no mueren, pero no funcionan adecuadamente hasta que se remueva el oxígeno) (Fulford 1998:30).

La digestión anaeróbica consta de cuatro etapas:

- **Hidrólisis:** La materia orgánica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos para lo cual debe ser descompuesta en agua (hidrólisis), formando compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis (Varnero 2011:18).

La materia orgánica, denominada “sustrato” en el proceso de digestión anaeróbica, está compuesta principalmente de carbohidratos, proteínas y lípidos o grasas. Diversos tipos de bacterias participan en este proceso para la descomposición de los polímeros mencionados.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los carbohidratos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores (Varnero 2011:19).

- Etapa fermentativa o acidogénica: Una vez que los polímeros han sido descompuestos en monómeros a través del proceso de hidrolisis, tiene lugar la fermentación de estas moléculas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de

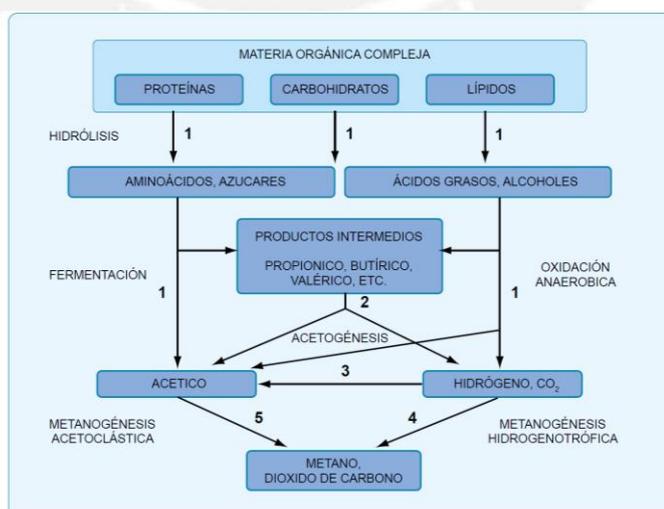
bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos es colectivamente denominado bacterias formadoras de ácidos (Varnero 2011:21).

- Etapa acetogénica: Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos ( $H_2$  y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato ( $CH_3COO^-$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ), a través de las bacterias acetogénicas.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Varnero 2011:22).

- Etapa metanogénica: En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. El ácido acético es el sustrato más importante para la producción de metano. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol (Varnero 2011:22).

Figura 2.2.- Proceso de digestión anaeróbica (Pavlostathis 1991: 425)



La figura 2.2 muestra las etapas y reacciones que ocurren en el proceso de digestión anaeróbica; los números representan los tipos de bacterias que participan en cada etapa de la siguiente manera: (Varnero 2011:19)

- 1: bacterias fermentativas;
- 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno;
- 3: bacterias homoacetogénicas;
- 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas;
- 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

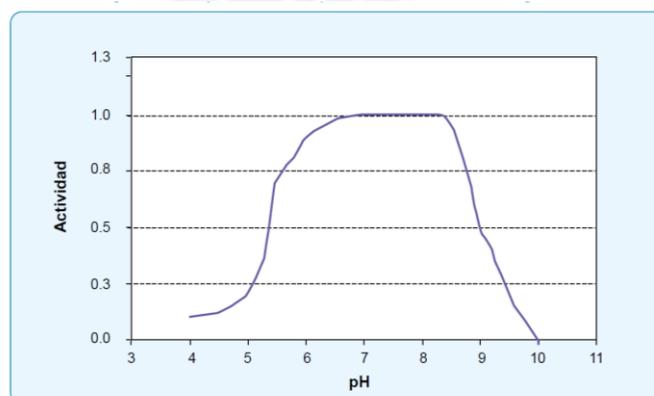
El proceso de digestión anaeróbica es un proceso complejo, dentro del cual existen factores o parámetros determinantes para el adecuado desarrollo del proceso:

- pH: El pH es la medida de la acidez, el proceso de biogás debe mantener un pH casi neutro, entre 7 y 8. El proceso de digestión anaeróbica controla por sí mismo el nivel de pH: en primer lugar las bacterias formadoras de ácido disminuyen el valor del pH por debajo de 7; sin embargo las bacterias metanogénicas utilizan este ácido por lo cual el pH vuelve a su valor neutro. (Fulford 1988:32).

El proceso es ligeramente alcalino debido a la formación de iones de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) producto de la disolución del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en agua.

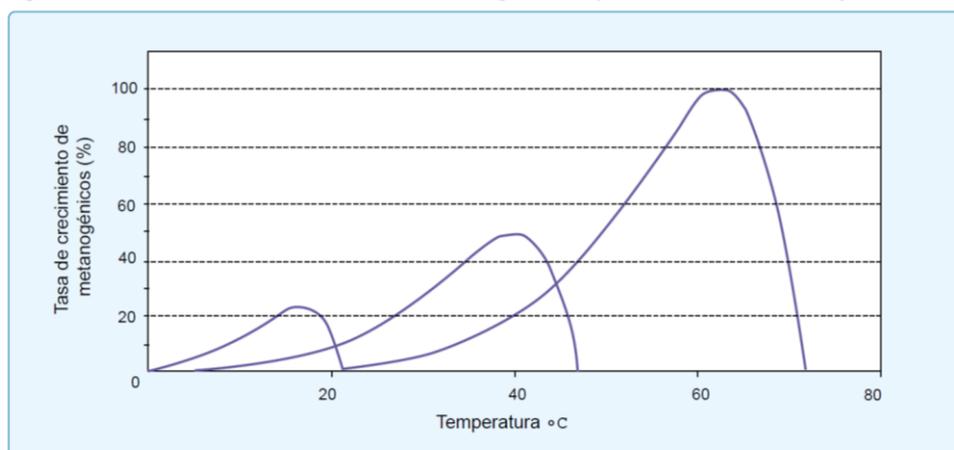
Sin embargo, la medición del pH es muy superficial debido al ciclo de amortización de pH. Cuando el valor del pH cae significa que el proceso ha fallado y las bacterias metanogénicas no están funcionando por algún factor. Es por esta razón que es recomendable medir la alcalinidad del proceso, principalmente medir la cantidad de bicarbonato. (Fulford 1988:32)

*Figura 2.3.- Dependencia del pH de la actividad metanogénica  
(Varnero 2011: 44, figura 3.5)*



- Temperatura: La temperatura es un factor determinante para la elección del tipo de bacterias que se utilizarán en los sub-procesos. La digestión anaeróbica alcanza mayor eficiencia en el rango de 45 a 60 °C, empleando bacterias termofílicas. Sin embargo, también se puede utilizar las bacterias mesofílicas que trabajan en un rango de temperatura entre 30 y 40 °C. Las características deben ser estudiadas para determinar la temperatura adecuada en el lugar donde se desarrollará el proceso. Las bacterias son muy sensibles frente al cambio de temperatura; principalmente en la etapa metanogénica; un cambio de 5 °C podría detener su funcionamiento. Es por esto que la temperatura es un factor determinante que debe ser controlado durante el proceso (Fulford 1988:33).
- Naturaleza y composición bioquímica de materias primas: La materia prima que será utilizada como alimento para el proceso de digestión anaeróbica puede ser de diversos tipos de naturaleza y composición; los residuos orgánicos pueden ser de origen animal, vegetal, humano, agroindustriales, forestales, entre otros. La composición de estas sustancias debe permitir la actividad microbiana de manera adecuada, proporcionando la cantidad adecuada de carbono y nitrógeno; asimismo generando un balance de las sales minerales presentes (Varnero 2011:29-32).

*Figura 2.4.- Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesofílicos y termofílicos (Varnero 2011: 39, figura 3.2)*



Esguerra ha clasificado los sustratos en cuatro clases en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO), como puede apreciarse en la Tabla 2.3. (1989: 23).

Tabla 2.3.- Clasificación de Sustratos (Esguerra 1989: 23)

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura Doméstica	> 20 % ST 40-70 % Fracción Orgánica
		Estiércol Sólido	
		Restos de Cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces Animales	100-150 g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces Animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS
		Aguas residuales de mataderos	
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/l DQO
		Aguas Negras	4-500 g/l DQO

Los sustratos de clase 1 pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch o por lotes. Los sustratos de la clase 2 son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua. Por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor, los sustratos de clase 3 deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio. En cuanto a los sustratos de clase 4, debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia (Varnero 2011: 31-33).

- Relación carbono/nitrógeno de materias primas: "El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso." (Varnero 2011:33)

- **Sólidos Totales**

Los residuos orgánicos están compuestos de agua y una parte sólida denominada sólidos totales (ST). Los sólidos totales indican el porcentaje de materia sólida de cada sustancia que se empleará en el proceso. Es un parámetro importante principalmente en la etapa metanogénica; un elevado contenido de sólidos limita la movilidad de las bacterias, por lo cual se ve afectada la eficiencia del proceso y la producción de biogás. Se ha determinado que en digestores semi-continuos, el proceso es eficiente cuando los niveles de sólidos totales no superan el 8 – 12%; mientras que en los digestores continuos entre 40 a 60%. (Varnero 2011:35)

- **Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis:** “El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado. Es interesante destacar que muchas de las bacterias anaeróbicas son capaces de degradar compuestos orgánicos refractarios.

En algunos casos, la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede ser reducida significativamente mediante la aclimatación de la población de microorganismos al tóxico. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso.” Principalmente se tiene las siguientes sustancias: (Varnero 2011:46)

- **Acidos Grasos Volátiles:** “La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. El término “volátil” indica que pueden ser recuperados por destilación a presión atmosférica. Durante la degradación anaeróbica, la materia orgánica compleja es hidrolizada y fermentada en compuestos de bajo peso molecular, incluyendo ácidos grasos de cadena corta (C2-C6). Estos incluyen principalmente ácidos acético, propiónico y butírico y en menores cantidades ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico.” (Varnero 2011: 47).

“En un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra usualmente en el rango de 50-250 mg HAc/l. Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los

AGV se acumulan. La inhibición de los metanogénicos debido a la toxicidad (sulfuro, amoníaco, metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, etc.), cambios en las condiciones ambientales (pH, temperatura, potencial redox) o limitación de nutrientes pueden gatillar una acumulación de acetato e hidrógeno. Una presión parcial de hidrógeno excesiva, inhibe severamente a las bacterias que degradan ácido propiónico, resultando en la acumulación de éste.” (Varnero 2011: 47).

“Al igual que el sulfuro y el amoníaco, las formas no ionizadas de AGV inhiben las bacterias metanogénicas cuando presentan concentraciones de 30-60 mg/L. Un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, implica una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás.” (Varnero 2011:47).

- Hidrógeno: “El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaeróbico. Su acumulación en el medio provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono.” (Varnero 2011:47).
- Nitrógeno amoniacal: “El amoníaco puede estar presente en las materias primas que entran al digestor o ser producido durante la degradación anaeróbica de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas o aminoácidos. Las proteínas generalmente contienen 16% de nitrógeno. Durante el proceso anaeróbico, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento.” (Varnero 2011:47).

“El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH del proceso.” (Varnero 2011:47).

De las dos especies, la que parece inhibir el proceso es el amoníaco libre ya que se ha comprobado experimentalmente que el efecto inhibitorio por amonio aumenta a pH alcalino. Además del pH, la cantidad de amoníaco libre depende de la concentración del sustrato, de la relación C/N, de la capacidad tamponadora del medio y de la temperatura de digestión. Obviamente, aquellos residuos que contengan mayores proporciones de proteínas u otros compuestos nitrogenados son los que presentan más problemas de inhibición por amonio. Se ha reportado que los digestores que operan a mayores temperaturas son más sensibles a la toxicidad por amonio que aquellos que operan en el rango termofílico.” (Varnero 2011:47-48)

- Sulfatos y sulfuros: “La presencia de elevadas concentraciones de sulfato en el sustrato puede producir la inhibición del proceso anaeróbico, especialmente de la metanogénesis. En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competencia determinará la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido.”

“El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos. El sulfuro puede producirse durante la degradación de materia orgánica que contiene azufre (proteínas), encontradas en residuos tales como el guano de cerdo. En general, los metanogénicos son más sensibles que los acidogénicos y acetogénicos, comenzando a ser tóxica una concentración de 50 mg/l, si los microorganismos metanogénicos no están aclimatados a los sulfuros. La forma más tóxica para los metanogénicos corresponde a la no ionizada (H<sub>2</sub>S), por lo que la inhibición se favorece a pH bajos y a bajas temperaturas. La forma ionizada (HS<sup>-</sup>) presenta menor toxicidad.”

“Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competencia por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda es una inhibición directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles.” (Varnero 2011:48)

- Cationes y metales pesados: “Los cationes de metales alcalinos y alcalino-térreos tienen un efecto estimulador de la actividad de las bacterias a bajas concentraciones. A partir de un nivel de concentración, pueden proporcionar toxicidad provocando una disminución de la velocidad de crecimiento.”

“La toxicidad de los cationes aumenta con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración. El orden de toxicidad de los metales pesados es: Ni > Cu > Cr(IV) ~ Cr (III) > Pb > Zn”.

“Los niveles de inhibición varían mucho en función de varios factores. Si la introducción del catión en el reactor se produce de forma gradual, los microorganismos pueden aclimatarse y el efecto tóxico es menor. Los metales solubles representan mayores problemas para el proceso que las formas insolubles. La presencia de sulfuros también disminuye la toxicidad de metales mediante la formación de sulfuros de metal insolubles (con excepción de cromo), los cuales precipitan, pudiendo llegar a tolerarse elevadas concentraciones de metales pesados en estos casos. Aproximadamente 0.5 mg de sulfuro es necesario para precipitar 1.0 mg de metal.”

“Cuando se presentan combinaciones de estos cationes, el efecto que se produce es más complejo. Algunos actúan antagónicamente, reduciendo la toxicidad, y otros actúan sinérgicamente aumentándola.” (Varnero 2011:48-49).

- Otros inhibidores: “Debido a que la etapa de fermentación metánica tiene etapas realizadas por microorganismos estrictamente anaeróbicos, el oxígeno es un tóxico más del proceso. Concentraciones del orden de 1 µg/l son inhibitoras. Otros inhibidores del proceso son el pH, determinadas sustancias orgánicas como ácidos grasos de cadena larga y alcoholes, en elevadas concentraciones, y la presencia de desinfectantes y antibióticos. En la Tabla 2.4 se presentan valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes. Estos valores se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias anaeróbicas presentan la capacidad de adaptarse después de un período de tiempo a condiciones que en un principio las afectaba severamente.” (Varnero 2011:49)

*Tabla 2.4.- Concentración inhibitora de sustancias en un proceso anaeróbico  
(Varnero 2011: 49)*

Inhibidores	Concentración inhibitora
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	5000 ppm
NaCl	40000ppm
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN <sup>-</sup>	25 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
Mg	1000-1500 mg/l

### 2.3.5. Destino del Biogás

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. Asimismo, este producto permite obtener energía eléctrica, energía térmica, entre otras a través del uso de equipos que permitan su transformación.

Es importante señalar que la producción de biogás en planta, reduce las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) considerándose como un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), ofreciendo la posibilidad de adquirir certificados de reducción de créditos de carbono o también denominados bonos de carbono, debido

a que el Perú es un país que no mantiene el compromiso de la reducción de emisiones.

Los principales destinos del biogás son los siguientes:

- **Energía Eléctrica:** El biogás es un combustible con un alto valor calórico, es debido a esta característica, sus aplicaciones están destinadas a la generación de energía. El biogás obtenido es inyectado a un combustor (equipo que usa el biogás como fuente de alimentación para obtener energía eléctrica) el cual quema el gas generando calor, provocando la evaporación de agua en la turbina de vapor, generando energía eléctrica. Cada metro cúbico de biogás genera aproximadamente 60 kW/h, siendo posible el uso de un foco por 6 horas.
- **Bonos de Carbono:** La implementación de una planta para obtención de biogás a partir de la digestión anaeróbica de sustrato orgánico, se clasifica según los lineamientos del MDL como un proyecto de reducción de emisiones de disposición final de residuos, debido a la captura de metano entrando al sector energía renovable no convencional por tratamiento de biomasa. Al ingresar a esta categoría se deberán emitir CERs (Certificados de reducción de emisiones generados por proyectos que deben cumplir lineamientos por el MDL).

### **2.3.6. Destino de Subproductos del Biogás**

Entre los subproductos de la digestión anaeróbica se puede obtener biol y biosol, los cuales son denominados como biofertilizantes, debido a que mantiene características beneficiosas para la nutrición y fertilización de suelos pobres.

- **Biol:** El efluente líquido resultante del proceso de biodigestión es denominado "Biol", el cual presenta ventajas como; la alta disponibilidad de nutrientes y la buena absorción por parte de las plantas, puede aplicarse inmediatamente extraído del biodigestor, o almacenarse en tanques tapados por un periodo no mayor a 4 semanas, para evitar grandes pérdidas de nitrógeno.
- **Biosol:** El biosol es un subproducto semisólido en forma de lodo, el cual se extrae de la cámara de digestión, luego del término del proceso de metanización del sustrato. Este producto puede ser manejado adicionándole material vegetal y compostándolo, produciendo pérdidas de nitrógeno del 30% al 70%, permitiendo tener un producto final compacto en forma de tierra negra, lo que facilita su transporte y aplicación. La generación del biosol será dependiente del periodo de descarga y arranque del sistema, como promedio por cada periodo se obtendrá el 1.5% de la capacidad de la cámara.

La biodigestión de residuos orgánicos no solo genera beneficios debido a la producción de biogás, como se ha mencionado, sus subproductos como el biol y biosol son también aprovechables, asimismo el sistema de biodigestión controla las emisiones de metano contribuyendo a mantener un ambiente saludable.

## **2.4. Compostaje**

El compostaje es el proceso biológico aeróbico que imita a la naturaleza para hacer que microorganismos, como bacterias, actinomicetos y hongos que son responsables del 95% de la generación del compostaje, actúen sobre la materia rápidamente biodegradable (biosol) permitiendo obtener compost o mantillo, que al ser aplicado en superficie se combinará con el humus logrado un suelo saludable, fértil y equilibrado para el desarrollo de la agricultura.

De esta manera, el compost es un nutriente para el suelo que ayuda a mejorar la estructura del mismo, a la vez, ayuda a reducir la erosión permitiendo que los nutrientes sean adsorbidos por las plantas.

El compostaje es un proceso que se viene efectuando desde tiempos remotos, pero actualmente existen grandes plantas industriales que hacen uso de este en ciudades donde han aprendido a realizar una segregación de sus residuos y permitir el uso de estos (Infoagro 2016:1; Abarrataldea 2016:3).

### **2.4.1. Propiedades del Compost**

Las principales propiedades del compost son las siguientes:

- Mejora las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua en el suelo. Se obtienen suelos más esponjosos y con mayor retención de agua.
- Mejora las propiedades químicas. Aumenta el contenido en macronutrientes N, P, K y micronutrientes y es fuente y almacén de nutrientes para los cultivos.
- Mejora la actividad biológica del suelo. Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización (Infoagro 2016:1).

## 2.4.2. Factores que condicionan el proceso de compostaje

El compostaje al tratarse de un proceso en el que se desarrollan microorganismos se necesitan algunas condiciones indispensables para que el proceso sea óptimo. Los más importantes son:

- Temperatura: el intervalo óptimo es entre 35-55 °C con la finalidad de lograr la eliminación de patógenos, parásitos y semillas de malas hierbas.

*Tabla 2.5.- Variación de la temperatura durante el proceso de compostaje  
(Román 2013: 23-24)*

Periodo	Semana 1 - 2 (Fase Mesófila)	Semana 3, 4, 5 (Fase Termófila)	Semana 6, 7 (Fase Mesófila)	Semana 8 (Madurez)
Referencia de temperatura	15° - 40°	40° - 65°	15° - 40°	10° - 25°

- Humedad: el proceso tiene que alcanzar un nivel ideal entre 40-60% esta humedad deberá ser controlada diariamente, pero para materiales fibrosos o residuos forestales gruesos la humedad máxima permisible es de 75-85%, en cambio para material vegetal fresco está entre 50-60%.
- pH: al tratarse de un proceso en el cual se desarrollan microorganismos es necesario tener en cuenta el rango óptimo, en el caso de hongo es un rango de 5-7 y para bacterias de 6-7.5.

*Tabla 2.6.- Variación del pH durante el proceso de compostaje  
(Román 2013: 29)*

Periodo	Semana 1 - 2 (Fase Mesófila)	Semana 3, 4, 5 (Fase Termófila)	Semana 6, 7 (Fase Mesófila)	Semana 8 (Madurez)
Referencia de pH	4 – 6	8 – 9	7 – 8	6 – 8

- Oxígeno: el oxígeno dependerá del tipo de material, humedad y textura.
- Relación C/N equilibrada; Es importante realizar una mezcla adecuada de los distintos residuos con diferentes relaciones de C/N para obtener un compost equilibrado. La tabla 2.7 muestra la relación C/N de algunos materiales.
- Población microbiana: el compostaje es un proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica, llevado a cabo por una amplia gama de población de bacterias, hongos y actinomicetes. (Infoagro 2016:1).

Tabla 2.7.- Relación de C/N de algunos materiales  
(Sztern 1999: 22)

<b>Materiales</b>	<b>C%</b>	<b>N%</b>	<b>C/n</b>
Aserrines	40	0.1	400
Podas, tallos, maíz	45	0.3	150
Paja de caña	40	0.5	80
Hojas de arboles	40	1	40
Estiércol de equino	15	0.5	30
Estiércol de ovino	16	0.8	20
Heno	40	2	20
Estiércol de bovino	7	0.5	15
Estiércol de gallina	15	1.5	10



### CAPÍTULO III

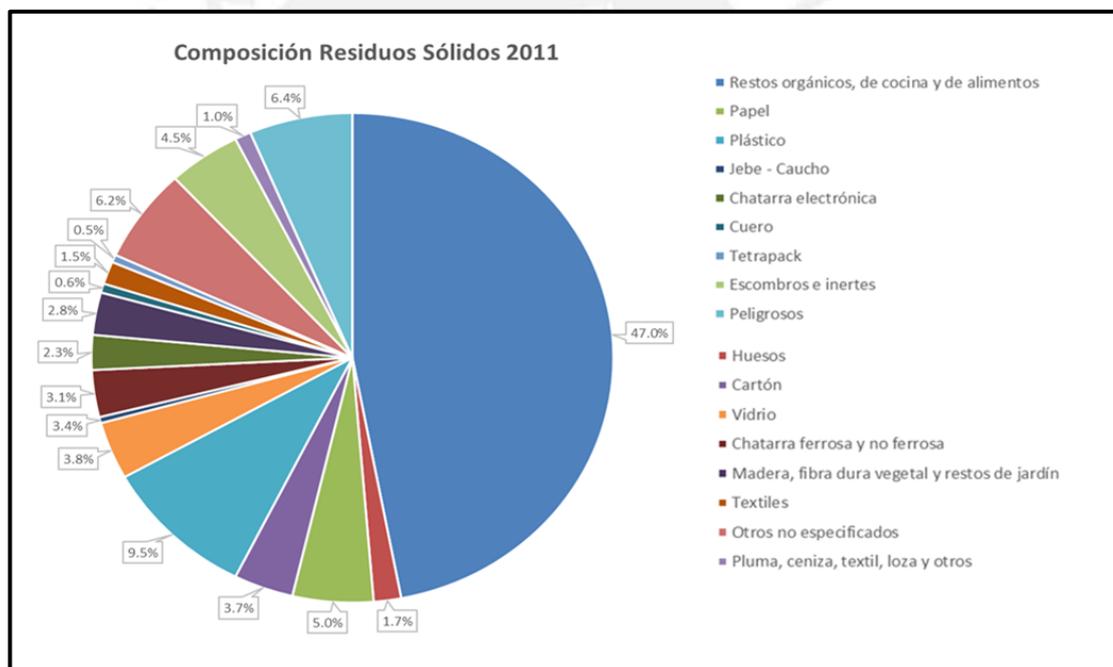
## RESIDUOS SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA - PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

### 3.1. Residuos sólidos generados en el Perú

#### 3.1.1. Residuos Generados en Perú

En el Perú gran parte de los residuos sólidos generados son los de tipo orgánico, pero la composición total de los residuos es diversa. En la figura 3.1 que se muestra a continuación se observa la composición de los residuos sólidos en el Perú para el año 2011.

Figura 3.1.- Composición de Residuos Sólidos en el Perú, 2011  
(INEI 2014: 280)

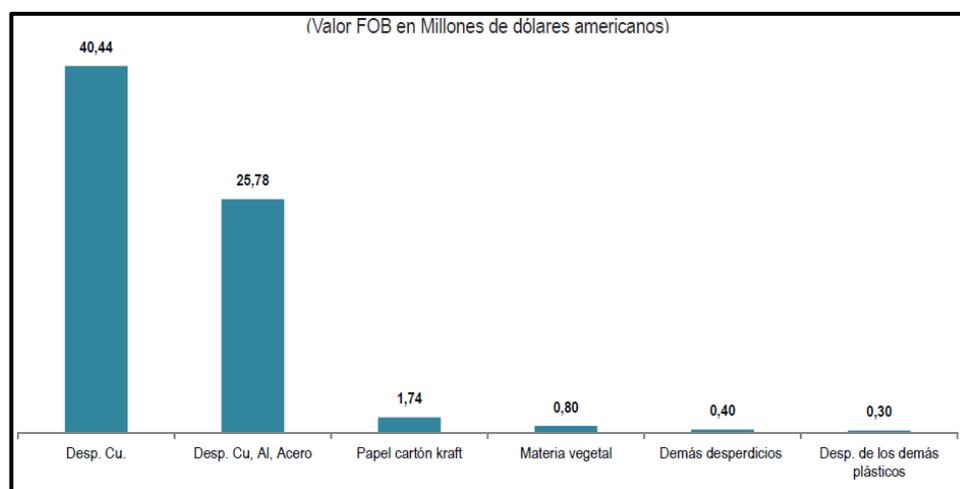


Como se aprecia en los porcentajes de la figura 3.1 los residuos orgánicos lideran la lista de residuos sólidos generados con un 47% del total de residuos sólidos, seguido de los plásticos de 9.5% y los residuos peligrosos con un 6.4%.

Dentro de todos los residuos sólidos generados existen algunos que son exportados al exterior y que siguen un proceso de reciclaje y disposición. En el año 2011 se alcanzó una exportación de 1,21 millones de toneladas lo que significa un valor total del FOB (Free On Board: término de comercialización internacional que significa libre

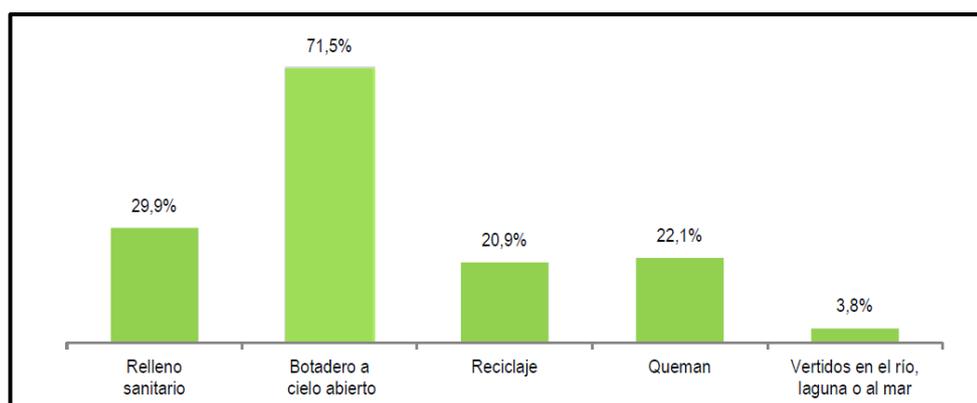
en puerto) de 69,46 millones de dólares americanos. Los residuos que alcanzaron mayor valor FOB fueron los desperdicios de cobre (Cu) con 40,44 millones de dólares americanos como se puede observar en la figura 3.2. (INEI 2014: 279-280)

*Figura 3.2.- Exportación de Residuos del Perú, 2011  
(INEI 2014: 280)*



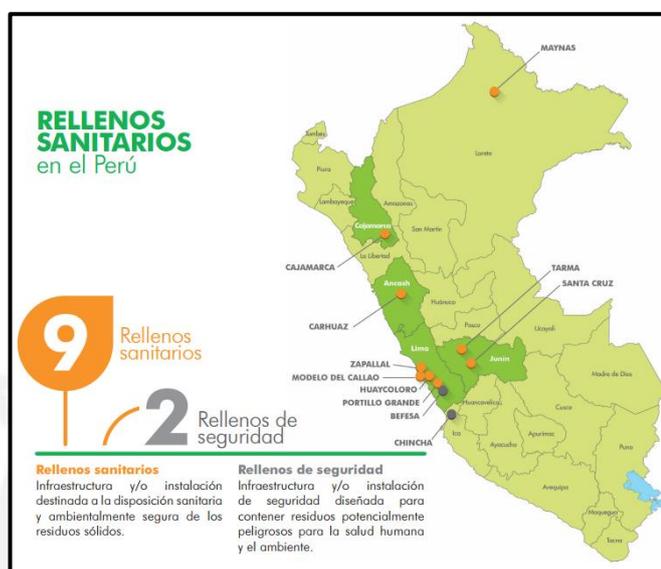
Todos los residuos generados en el Perú son recolectados por las municipalidades quienes los envían a rellenos sanitarios (instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos), rellenos de seguridad (instalación diseñada para contener residuos peligrosos para la salud humana y ambiente), botaderos a cielo abierto, procesos de reciclaje, o simplemente quema o vertidos a un río. La figura 3.3 muestra el destino de la disposición final de los residuos sólidos municipales en el año 2012. El 29.9% se dispone en rellenos sanitarios, el 71.5% se dispone en botaderos a cielo abierto, el 20.9% es reciclado, el 22.1% es incinerado o quemado y un 3.8% es vertido al río. (INEI 2014: 279)

*Figura 3.3.- Destinos finales de la basura recolectada por las municipalidades, 2012. (INEI 2014: 279)*



Una problemática destacada es que actualmente, el volumen de la basura generada en el Perú es mayor a los depósitos autorizados para los residuos sólidos. Efectivamente el Perú solo se cuenta con 9 rellenos sanitarios autorizados y 2 rellenos de seguridad ubicados en diversos puntos del Perú, como se muestra en la figura 3.4 (OEFA 2014b: 21).

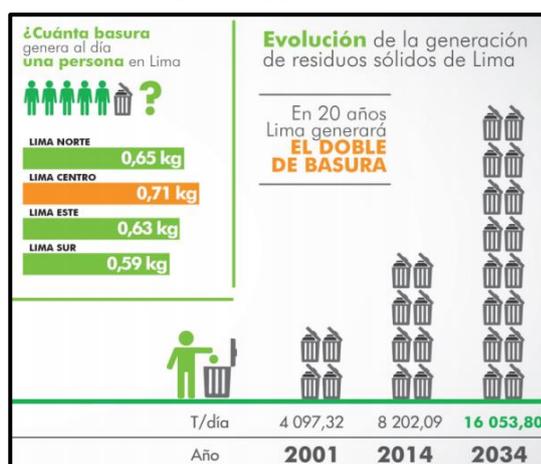
Figura 3.4.- Rellenos sanitarios y de seguridad en el Perú (OEFA 2014b: 21)



### 3.1.2. Residuos Generados en Lima

Actualmente Lima genera más de 7400 toneladas de basura por día, que es un aproximado de 0.65 kg de basura por habitante; y se estima que en los siguientes años la generación de basura se duplicará. En la figura 3.5 se muestra la generación de residuos sólidos por persona en Lima, así como la proyección de la generación de los residuos sólidos en un futuro. (OEFA 2014b: 13)

Figura 3.5.- Residuos Sólidos en Lima en Estadísticas (OEFA 2014b: 13)



Los residuos sólidos generados en Lima son en su mayoría los de tipo orgánico, seguido por los de plásticos y cartón, tal como se evidencia en la figura 3.6. Estos residuos son enviados a 4 rellenos sanitarios: Zapallal, Huaycoloro, Portillo Grande y Modelo del Callao; pero cabe mencionar que sólo el 88% de la basura es recolectada. (OEFA 2014b: 14-15)

Figura 3.6.- Residuos Sólidos Generado en Lima (OEFA 2014b: 14)

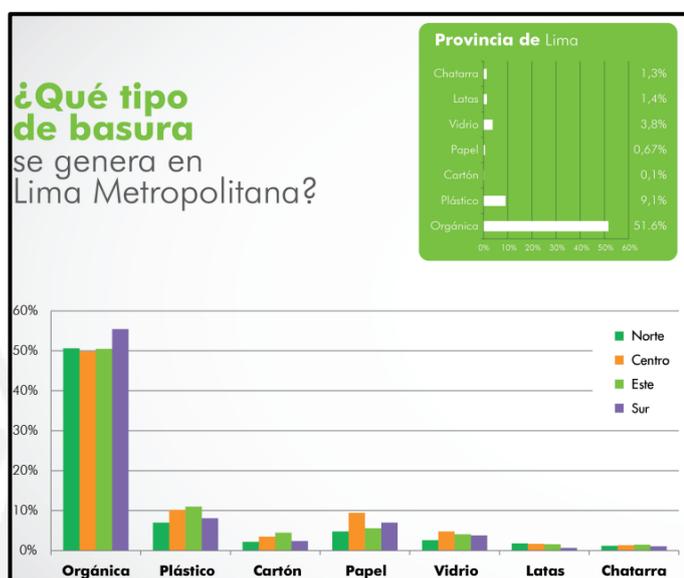
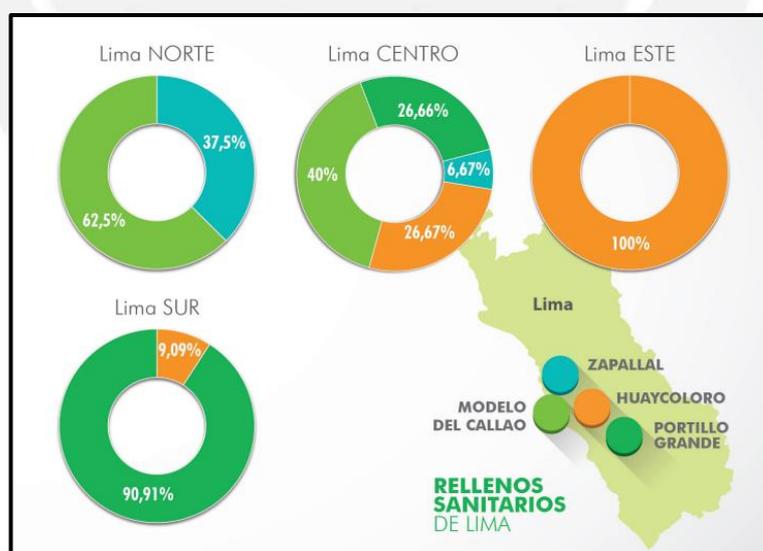


Figura 3.7.- Porcentaje de Residuos Sólidos enviados a Rellenos Sanitarios (OEFA 2014b: 15)



### 3.1.3. Manejo de residuos sólidos de gestión municipal

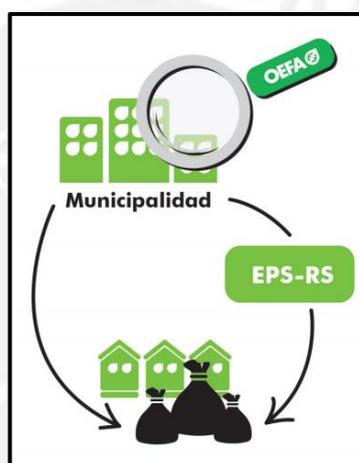
El encargado de entregar a las municipalidades los residuos sólidos es el generador de los mismos, posteriormente estos son entregados a las respectivas EPS-RS

(Empresa Prestadora de Servicios de Residuos Sólidos), quienes son las responsables de su adecuado manejo (ver figura 3.8).

Cuando los generadores tienen en su posesión los residuos las municipalidades son los encargados de fiscalizar su adecuado manejo.

Una vez que los residuos son entregados a las municipalidades distritales que puede o no haber contratado un EPS-RS autorizada la fiscalización está a cargo de las municipalidades provinciales. A su vez el ente encargado de supervisar el manejo adecuado de los residuos por parte a estas es el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (OEFA 2014b: 17)

*Figura 3.8.- Manejo de residuos sólidos de gestión municipal*  
(OEFA 2014b: 17)



### **3.1.4. Manejo de residuos de gestión no municipal**

Para este tipo de residuos el generador es el responsable de su manejo y adecuada disposición, para esto puede encargarse él mismo o contratar a una EPS-RS. Al entregarse los residuos sólidos a las EPS-RS, estas instituciones son las responsables de la adecuada disposición de los desechos. Pero cabe destacar que el generador tiene parte de responsabilidad ya que tiene que velar porque se haya realizado una correcta segregación antes de entregar los residuos.

Los encargados de fiscalizar estos residuos, cuando aún se encuentra en poder del generador, son las autoridades sectoriales en el marco de sus funciones también conocidos como Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA). Esta fiscalización además de analizar los residuos verifica la infraestructura, el proceso de tratamiento,

entre otros. Por otro lado, la OEFA se encargará de que dicho fiscalizador cumpla con sus deberes correspondientes. (OEFA 2014b: 18)

A continuación, en la figura 3.9, se muestra un esquema de la gestión integral de almacenamiento, recolección, tratamiento, transferencia y disposición final que siguen los residuos sólidos.

Figura 3.9.- Gestión Integral de Residuos Sólidos (OEFA 2014b: 19)

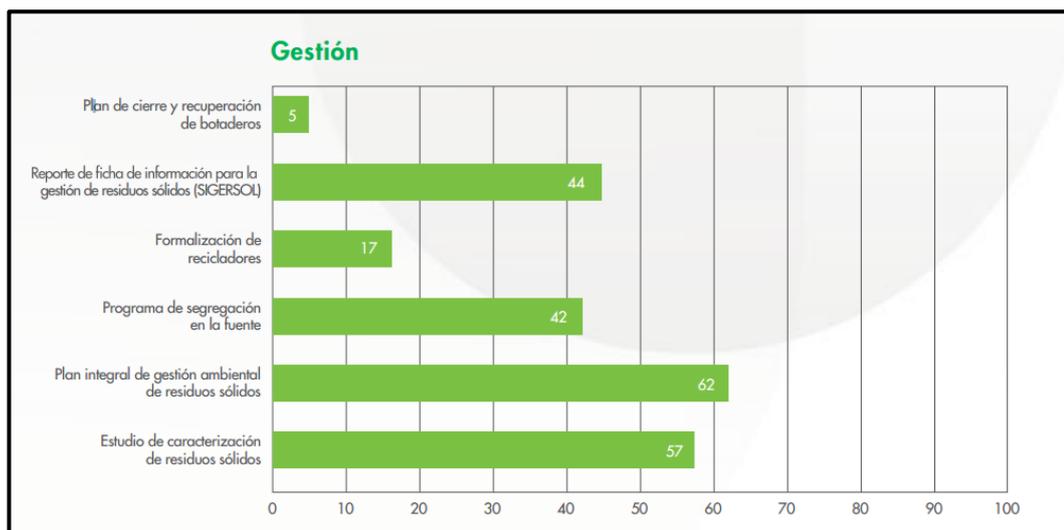


Las Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA) son supervisadas anualmente por la OEFA. Dicha supervisión evalúa el cumplimiento de las EFA respecto a la gestión de residuos, los componentes que se evalúan son:

- Plan de cierre y recuperación de botaderos.
- Reporte de ficha de información para la gestión de residuos sólidos: SIGERSOL (Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos).
- Formalización de recicladores.
- Programa de segregación en la fuente.
- Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos.
- Estudio de caracterización de residuos sólidos.

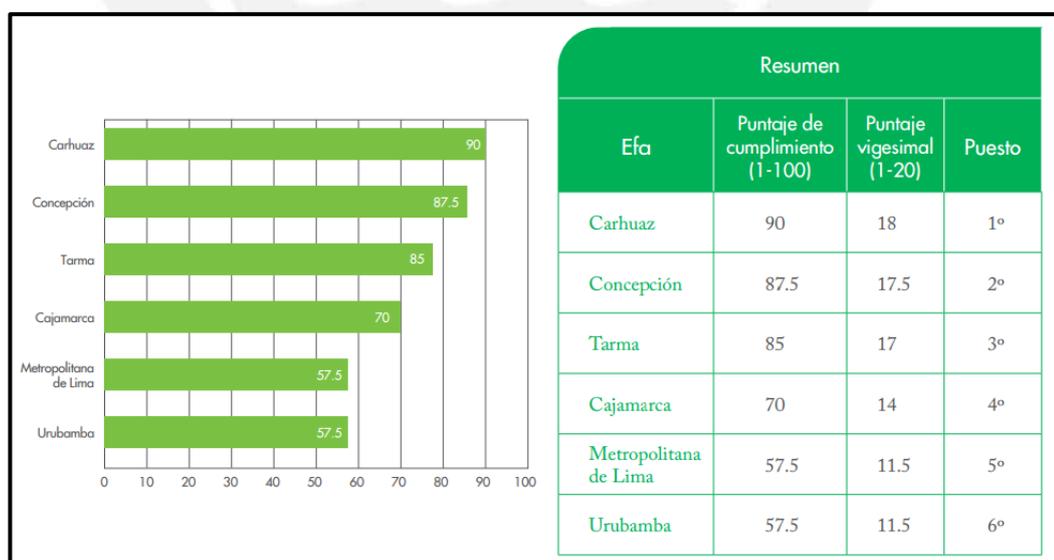
La figura 3.10 muestra los resultados de las supervisiones a las EFA por componentes a nivel nacional:

Figura 3.10.- Porcentaje de cumplimiento de las EFA respecto a la gestión de residuos sólidos a nivel nacional (OEFA 2014a: 177)



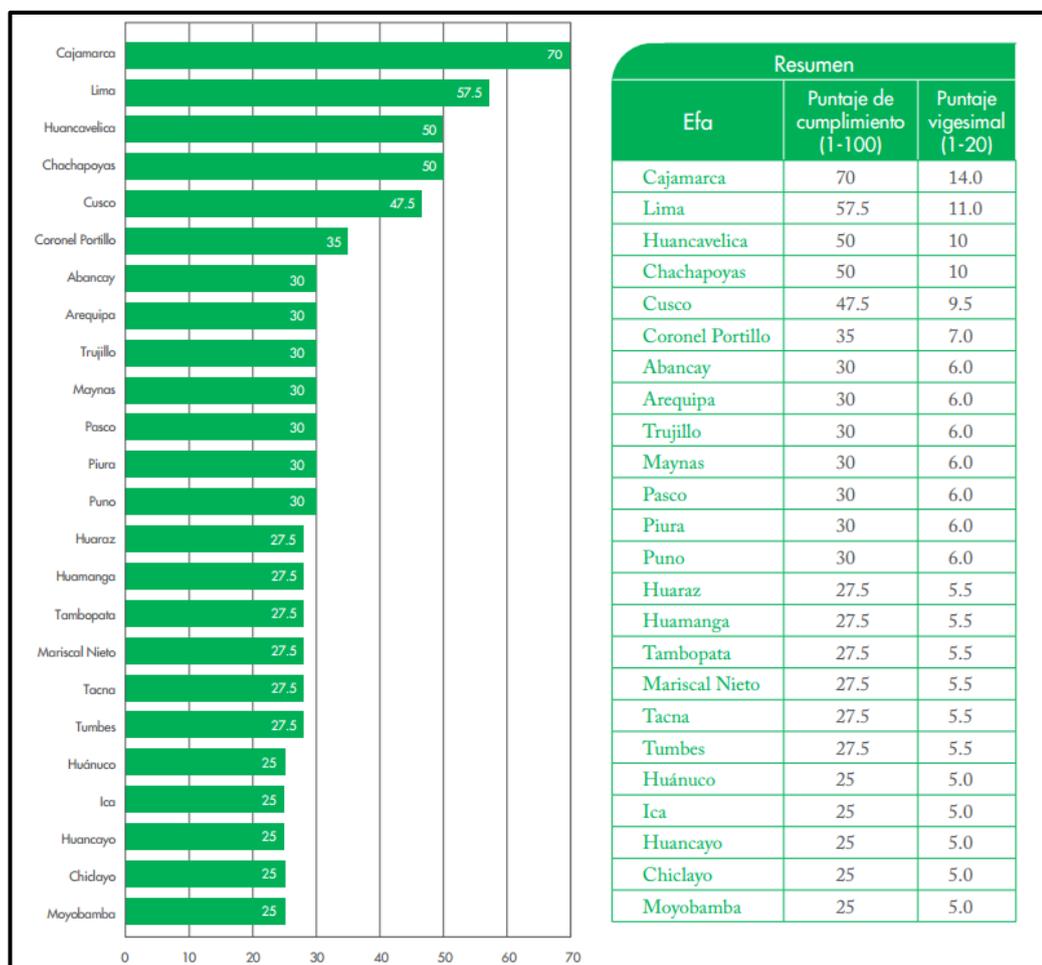
Por otro lado, también se hace una evaluación a las municipalidades en el cumplimiento de su gestión y manejo de sus residuos sólidos. En esta evaluación realizada entre el 2013 y 2014 se obtuvo como resultado que la municipalidad de la ciudad de Carhuaz está ubicada en el primer puesto, seguida por la de la ciudad de Concepción y Tarma, en segundo y tercer puesto respectivamente como se observa en la figura 3.11. (OEFA 2014a: 179)

Figura 3.11.- Evaluación de la gestión y manejo de residuos sólidos municipales a nivel nacional (OEFA 2014a: 179)



Así mismo, también se evalúa el cumplimiento de Gestión de Residuos Sólidos a nivel de capitales de regiones, siendo estas 24. Por ejemplo, la provincia capital que obtuvo el mayor puntaje fue la municipalidad provincial de Cajamarca con un 70%, seguida por la municipalidad de Lima con 57.5% y la municipalidad de Huancavelica con 50%; tal cual se puede apreciar en la figura 3.12. (OEFA 2014a: 180)

Figura 3.12.- Ranking de cumplimiento en la gestión y manejo de residuos sólidos a nivel de capital de región (OEFA 2014a: 180)

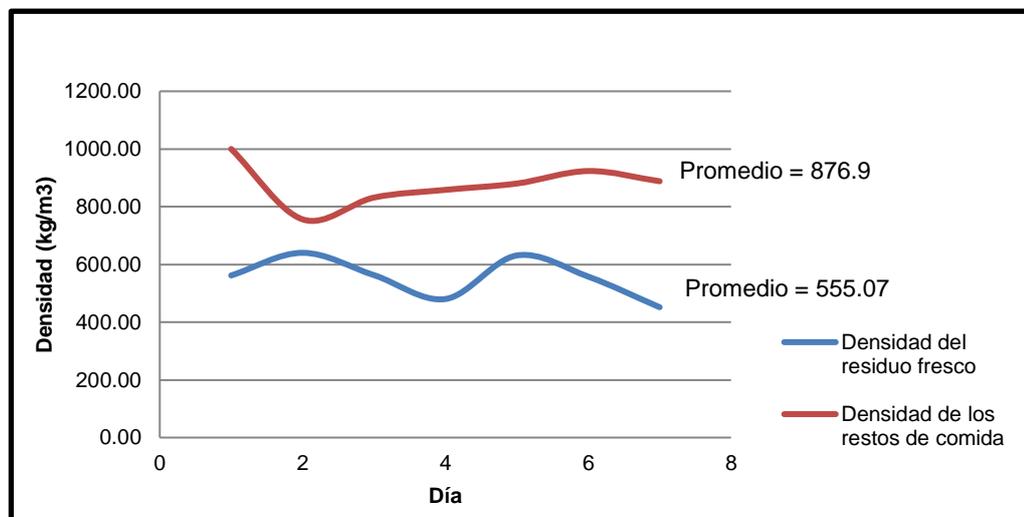


### 3.2. Residuos Generados en mina seleccionada

En la unidad minera seleccionada, se tiene 95 puntos de acopio de residuos sólidos. De los cuales se ha seleccionado aquellos puntos que tienen mayor porcentaje de residuos sólidos; los cuales son los puntos de acopio de los comedores y zonas de cocina. La generación promedio de residuos sólidos en los puntos seleccionados es de 361.67 kg por día.

Asimismo, la densidad promedio de estos residuos es de 509.23 kg/m<sup>3</sup>; teniendo un máximo valor de 595.63 y un mínimo de 432.18 kg/m<sup>3</sup>. La figura 3.13 muestra la variación de los valores de densidad de los residuos estudiados.

Figura 3.13.- Variación de los valores de densidad de los residuos en general



Todos los residuos generados están compuestos por 21 componentes, de los cuales 17 son inorgánicos, 3 orgánicos y 1 denominado como otros (residuos difíciles de segregar). A continuación, se muestra la tabla 3.1 en la que se brinda el detalle de los residuos generados. La figura 3.14 detalla el porcentaje de residuos sólidos en función de su composición.

Tabla 3.1.- Composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos

Nº	Componentes	Promedio Kg.	%
Componente inorgánicos			
1	Papel y Cartón	7.904	0.546
2	Vidrio	2.440	0.168
3	Hojalata (Metal Ferroso)	6.967	0.481
4	Aluminio (Metal No Ferroso)	0.145	0.010
5	Plástico - PET(1)	0.917	0.063
6	Plástico - PEAD (2)	6.616	0.457
7	Plástico - PVC (3)	0.365	0.025
8	Plástico - PEBD (4)	25.886	1.787
9	Plástico - PP (5)	4.901	0.338
10	Plástico - PS (6)	1.173	0.081
11	Tecnopor - PS no reciclable	1.044	0.072

12	Telas	1.270	0.088
13	Losa	8.593	0.593
14	Servilletas húmedas	18.624	1.285
15	Látex	0.802	0.055
16	Tetra pack	0.165	0.011
17	Acero	0.262	0.018
<b>Total de residuos Inorgánicos</b>		<b>88.074</b>	<b>6.079</b>
Componente orgánicos			
18	Residuos fresco	478.307	33.014
19	Restos de comida	750.764	51.819
20	Huesos y carnes	119.787	8.268
<b>Total de residuos Orgánicos</b>		<b>1348.858</b>	<b>93.101</b>
21	Otros	11.881	0.820
<b>TOTAL</b>		<b>1448.813</b>	<b>100.000</b>

Nota:

(1) Polietileno Teraftalato

(4) Polietileno de baja densidad

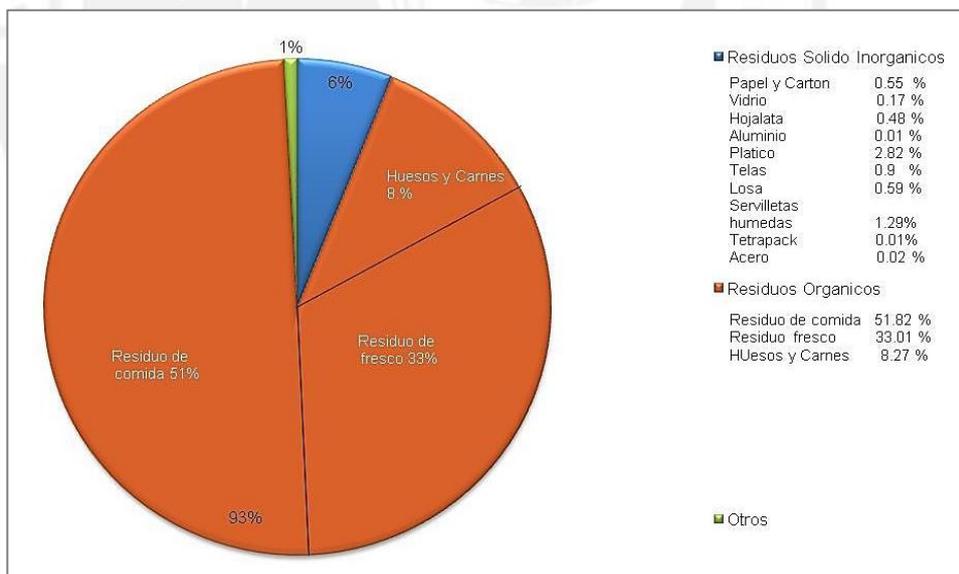
(2) Polietileno de alta densidad

(5) Polipropileno

(3) Policloruro de vinilo

(6) Poliestireno

Figura 3.14.- Composición de residuos sólidos

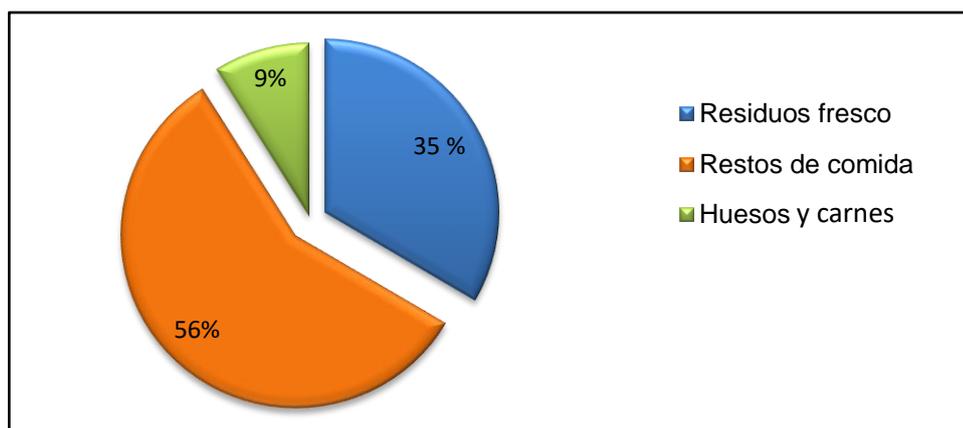


Los residuos orgánicos recolectados son segregados en función de su composición física. Estos residuos pueden ser segregados como: residuos frescos, restos de comida y huesos y carnes. En el siguiente cuadro se muestra el promedio anual en kilogramos y el porcentaje de estos residuos.

Tabla 3.2.- Composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos

Componentes	Promedio kg.	%	ton/ día	ton/mes	ton/año
<b>Residuos fresco</b>	478.307	35.46%	0.478	14.349	172.191
<b>Restos de comida</b>	750.764	55.66%	0.751	22.523	270.275
<b>Huesos y carnes</b>	119.787	8.88%	0.120	3.594	43.123
<b>TOTAL</b>	<b>1348.859</b>	<b>100.00%</b>	<b>1.349</b>	<b>40.466</b>	<b>485.589</b>

Figura 3.15.- Composición física de la fracción orgánica de los residuos sólidos



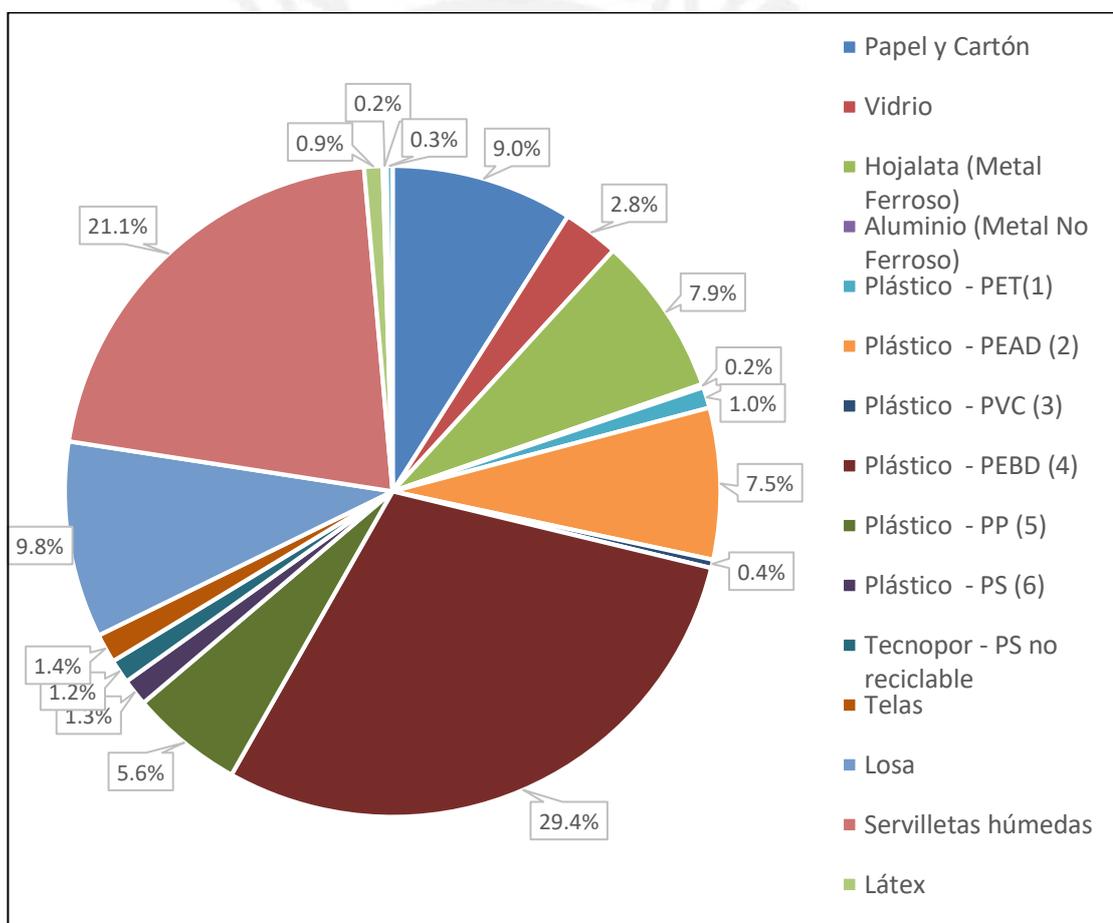
Así mismo, los residuos inorgánicos conforman el 6% del total de los residuos sólidos. En la siguiente tabla se muestra la composición de estos residuos, donde el polietileno de baja densidad representa el 29% del total de estos (ver figura 3.16).

Tabla 3.3.- Composición de la fracción inorgánica de los residuos sólidos

Componentes	Promedio Kg.	%
<b>Componente inorgánico</b>		
Papel y Cartón	7.904	8.97
Vidrio	2.44	2.77
Hojalata (Metal Ferroso)	6.967	7.91
Aluminio (Metal No Ferroso)	0.145	0.16
Plástico - PET(1)	0.917	1.04
Plástico - PEAD (2)	6.616	7.51
Plástico - PVC (3)	0.365	0.41
Plástico - PEBD (4)	25.886	29.39
Plástico - PP (5)	4.901	5.56

Plástico - PS (6)	1.173	1.33
Tecnopor - PS no reciclable	1.044	1.19
Telas	1.27	1.44
Losa	8.593	9.76
Servilletas húmedas	18.624	21.15
Látex	0.802	0.91
Tetra pack	0.165	0.19
Acero	0.262	0.30
<b>Total de residuos Inorgánicos</b>	<b>88.074</b>	<b>100.00</b>

Figura 3.16.- Composición física de los residuos inorgánicos



## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS TÉCNICO DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN UNIDAD MINERA**

#### **4.1 Datos Generales de la Unidad Minera**

La unidad minera analizada se ubica en el departamento de Ica, a 1,800 msnm; se dedica a la explotación de minerales polimetálicos de manera subterránea. Actualmente cuenta con 2,300 trabajadores aproximadamente, entre servidores de compañía y de las empresas contratistas, los cuales prestan servicios en las diferentes etapas del proceso minero. El régimen laboral de los trabajadores en la unidad minera es variable, siendo de 5 por 2, 10 por 4 y 14 por 7. La unidad minera cuenta con infraestructura que presta los servicios básicos, módulo de comedores, viviendas, posta médica, área de recreación. Asimismo, cuenta con infraestructura para la extracción, procesamiento de mineral e infraestructura para disposición de relaves filtrados, almacenamiento y disposición de residuos sólidos.

La unidad minera cuenta con seis comedores y dos zonas de cocina, de la actividad se generan residuos orgánicos como restos de comida cocida, verdura y carne, así como residuos inorgánicos entre ellos bolsas plásticas, botellas de polietileno, latas, entre otros. Se ha estimado que los residuos orgánicos generados son aproximadamente 1.35 ton/día.

La empresa minera emplea el 23% de los residuos sólidos orgánicos generados anualmente a través de un proceso de compostaje; la cantidad restante es dispuesta en el área de micro relleno sanitario. Sin embargo, esta área presenta malos olores y presencia de vectores (organismos que pueden transmitir o propagar enfermedades). Estos residuos orgánicos tienen potencial de aprovechamiento energético a partir del biogás, que actualmente no está siendo utilizado estratégicamente. El presente capítulo desarrollará el análisis de factibilidad técnico – económico para la implementación de un sistema de tratamiento de residuos orgánicos para la obtención de biogás y compost.

#### **4.2 Estudio de Factibilidad Técnico Económico**

#### **4.2.1 Definición del Sustrato**

El sustrato (término genérico para designar, en general, el alimento de los microorganismos en el proceso de digestión) utilizado para el desarrollo del proyecto son los residuos sólidos orgánicos, llamados también residuos putrescibles generados en los comedores y zonas de cocina de la unidad minera, que, a través de una descomposición anaeróbica, podrán generar biogás. Esta porción orgánica de los residuos sólidos generados, a simple \*vista está constituida por residuos sólidos frescos (desperdicios de frutas y verduras no cocidas), restos de comida, huesos y carnes. De los cuales a través de una evaluación química se podrá determinar cuál es la porción idónea que será utilizada para la generación de biogás.

En la actualidad la unidad minera cuenta con dos empresas concesionarias encargadas de brindar el servicio de alimentación al personal de la compañía y empresas contratistas, las cuales abarcan 2 zonas de cocina y 6 comedores.

En cada comedor y zona de cocina, se cuenta con puntos de acopio acondicionados para el almacenamiento de los residuos orgánicos e inorgánicos que se generan.

Los residuos sólidos recolectados en estos puntos de acopio en los cuales se registra un alto porcentaje de residuos sólidos orgánicos, serán el sustrato utilizado para la producción del biogás.

#### **4.2.2 Caracterización de los Sustratos**

El estudio se realizó en base a una adaptación metodológica de los estudios convencionales realizados para residuos sólidos domiciliarios, en la cual a través de procedimientos estadísticos se determinaron parámetros que contribuirán a la optimización de la gestión y manejo de los residuos sólidos generados por una población.

Para el caso particular de la unidad minera, se ha considerado los puntos de acopio de las zonas de cocina y comedores, generando 4 puntos de acopio, de los cuales se ha tomado los siguientes datos:

##### **a) Producción Per Cápita**

Se tiene una generación promedio de 0.614 kg de residuos sólidos de comedores por trabajador por día, los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Asimismo se tiene que la generación promedio de residuos sólidos es de 361.67 kg/día de los cuatro puntos de acopio, los resultados se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.1.- Cálculo de Generación Per Cápita (GPC) de residuos sólidos  
(ESCEGIS SRL 2013: 18)

Establecimiento	Código	N° Personas	GPC kg/per/día
Punto de acopio 1	P-01	256	0.749
Punto de acopio 2	P-02	720	0.756
Punto de acopio 3	P-03	508	0.486
Punto de acopio 4	P-04	870	0.533
Promedio			0.614

Tabla 4.2.- Cálculo de Generación por Punto de Acopio (GPA) de residuos sólidos  
(ESCEGIS SRL 2013: 18)

Establecimiento	Código	GPE
Punto de Acopio 1	P-01	191.74
Punto de Acopio 2	P-02	544.32
Punto de Acopio 3	P-03	246.89
Punto de Acopio 4	P-04	463.71
Promedio		361.67

b) Densidad

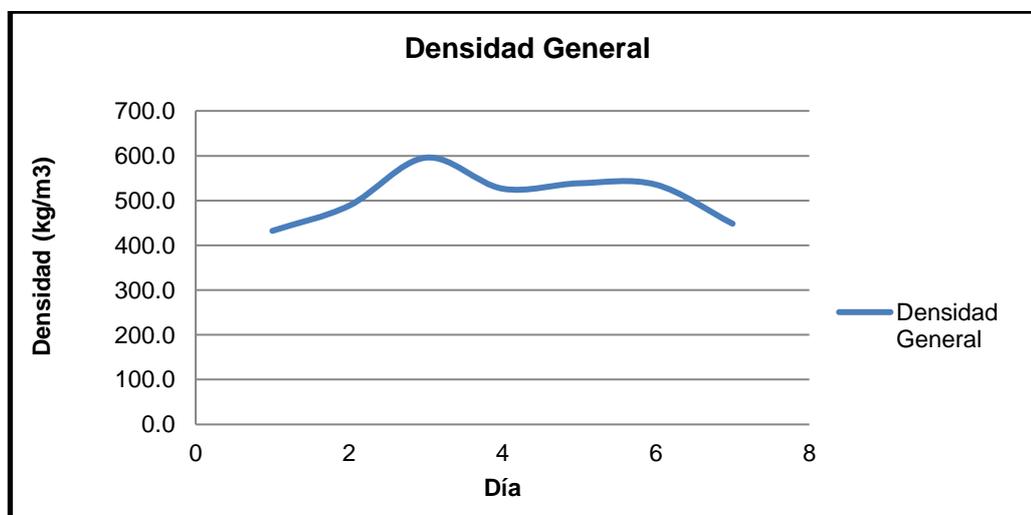
Se obtuvo una densidad promedio de 509.23 kg por cada metro cúbico de residuos sólidos generados en los puntos de acopio, tal como se puede observar en la tabla 4.3.

Tabla N° 4.3.- Densidad general promedio de los residuos sólidos  
(ESCEGIS SRL 2013: 19)

Densidad promedio		
Día 1	432.18	kg/m <sup>3</sup>
Día 2	488.34	kg/m <sup>3</sup>
Día 3	595.63	kg/m <sup>3</sup>
Día 4	526.41	kg/m <sup>3</sup>
Día 5	538.45	kg/m <sup>3</sup>
Día 6	535.36	kg/m <sup>3</sup>
Día 7	448.23	kg/m <sup>3</sup>
Promedio total	509.23	kg/m <sup>3</sup>

El gráfico 4.1 muestra la variación de densidad de los residuos en general. Los valores se encuentran entre 432.18 y 595.63 kg/m<sup>3</sup>.

Gráfico 4.1. Variación de los valores de densidad de los residuos en general  
(ESCEGIS SRL 2013:19)

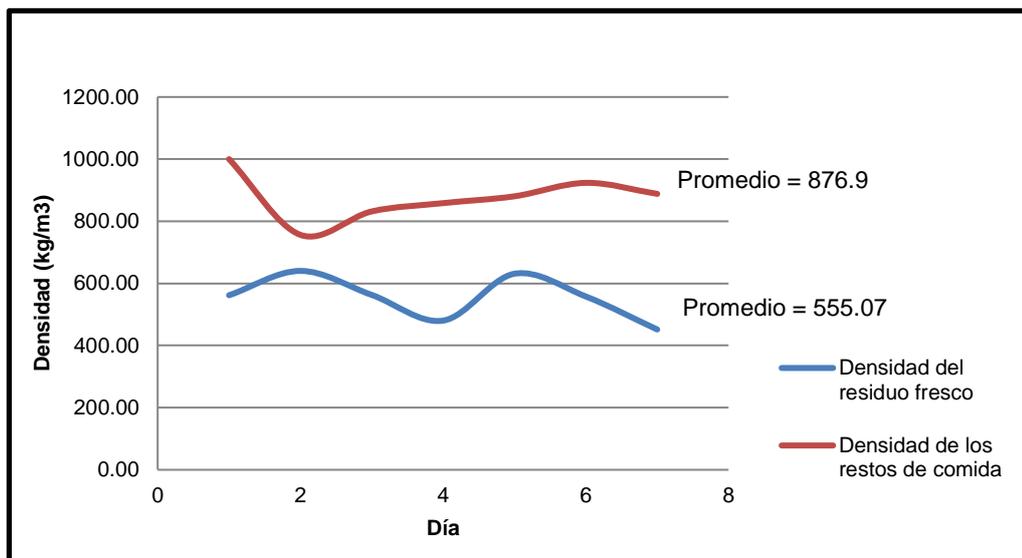


El gráfico 4.2 muestra la variación de densidad para la fracción orgánica de los residuos generados. El promedio de la densidad de restos de comida es de 876.9 Kg/m<sup>3</sup> y la densidad de residuo fresco es de 555.07 Kg/m<sup>3</sup>, teniendo como promedio total 715.38 Kg/m<sup>3</sup>, según los resultados de la tabla 4.4.

Tabla 4.4.- Densidad promedio del componente orgánico  
(ESCEGIS SRL 2013: 20)

Densidad promedio			
Días	Residuo fresco	Residuo de comida	Unidad
Día 1	561.85	999.97	kg/m <sup>3</sup>
Día 2	640.17	756.23	kg/m <sup>3</sup>
Día 3	562.83	831.69	kg/m <sup>3</sup>
Día 4	480.15	858.34	kg/m <sup>3</sup>
Día 5	631.11	880.34	kg/m <sup>3</sup>
Día 6	557.77	923.61	kg/m <sup>3</sup>
Día 7	451.61	888.10	kg/m <sup>3</sup>
Promedio	555.07	876.90	kg/m <sup>3</sup>

Gráfico 4.2.- Variación de los valores de densidad del componente orgánico  
(ESCEGIS SRL 2013: 20)



c) Composición Física

La tabla 4.5 presenta 21 componentes identificados, siendo 17 componentes inorgánicos, 3 componentes orgánicos y 1 componente denominado como otros, el cual está compuesto por una mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos de difícil segregación.

Tabla 4.5.- Composición física de los residuos sólidos  
(ESCEGIS SRL 2013: 21)

Nº	Componentes	Promedio Kg.	%
Componente inorgánicos			
1	Papel y Cartón	7.904	0.546
2	Vidrio	2.440	0.168
3	Hojalata (Metal Ferroso)	6.967	0.481
4	Aluminio (Metal No Ferroso)	0.145	0.010
5	Plástico - PET(1)	0.917	0.063
6	Plástico - PEAD (2)	6.616	0.457
7	Plástico - PVC (3)	0.365	0.025
8	Plástico - PEBD (4)	25.886	1.787
9	Plástico - PP (5)	4.901	0.338
10	Plástico - PS (6)	1.173	0.081
11	Tecnopor - PS no reciclable	1.044	0.072
12	Telas	1.270	0.088
13	Losa	8.593	0.593

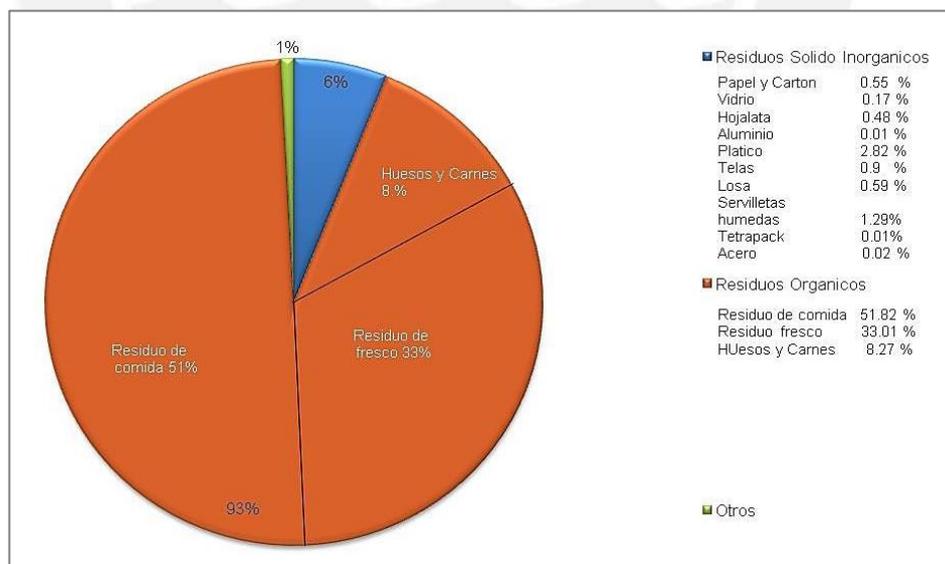
14	Servilletas húmedas	18.624	1.285
15	Látex	0.802	0.055
16	Tetra pack	0.165	0.011
17	Acero	0.262	0.018
	Total de residuos Inorgánicos	88.074	6.079
<b>Componente orgánicos</b>			
18	Residuos fresco	478.307	33.014
19	Restos de comida	750.764	51.819
20	Huesos y carnes	119.787	8.268
	Total de residuos Orgánicos	1348.858	93.101
21	Otros	11.881	0.820
	<b>Total</b>	<b>1448.813</b>	<b>100.000</b>

NOTA

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| (1) Polietileno Teraftalato      | (4) Polietileno de baja densidad |
| (2) Polietileno de alta densidad | (5) Polipropileno                |
| (3) Policloruro de vinilo        | (6) Poliestireno                 |

De la tabla 4.5 podemos obtener el gráfico 4.3 sobre la composición de los residuos sólidos, considerando que el porcentaje de residuos inorgánicos es menor al 10 % del total.

Gráfico 4.3.- Composición de residuos sólidos (ESCEGIS SRL 2013: 22)

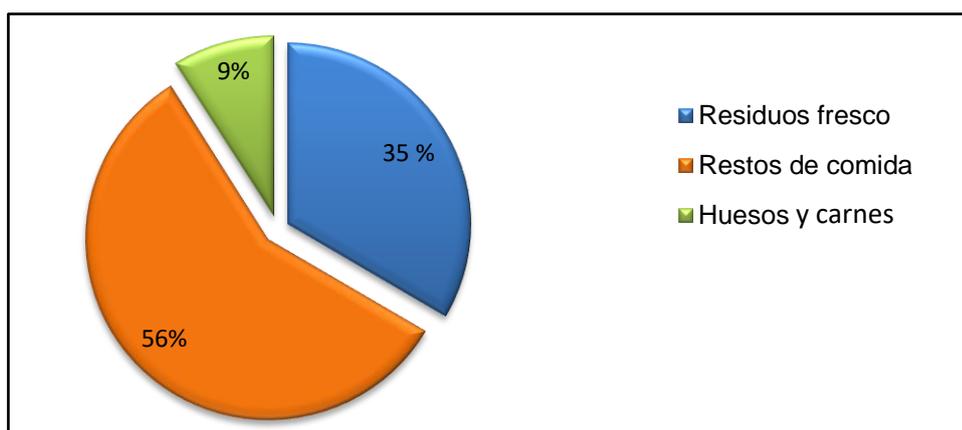


Del gráfico 4.3 se puede observar que la materia orgánica representa el 93% de los residuos generados en los cuatro puntos de acopio. Asimismo, en la tabla 4.6 se puede observar que esta fracción orgánica está compuesta en un 55.66 % de restos de comida, 35.46% residuos frescos y un 8.88% de Huesos y carnes.

Tabla 4.6.- Composición de la fracción orgánica de los residuos sólidos  
(ESCEGIS SRL 2013: 22)

Componentes	Promedio kg.	%	ton/ día	ton/mes	ton/año
Residuos fresco	478.307	35.46%	0.478	14.349	172.191
Restos de comida	750.764	55.66%	0.751	22.523	270.275
Huesos y carnes	119.787	8.88%	0.120	3.594	43.123
Total	1348.859	100.00%	1.349	40.466	485.589

Gráfico 4.4.- Composición física de la fracción orgánica de los residuos sólidos  
(ESCEGIS SRL 2013: 23)



d) Humedad

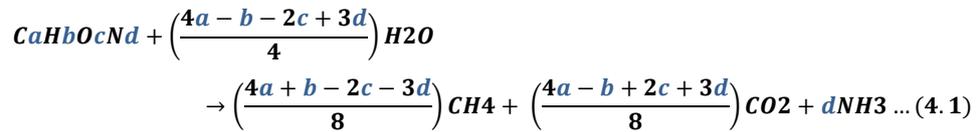
Los ensayos de laboratorio de las muestras analizadas, determinaron que el promedio de humedad del componente orgánico de los residuos es 50.71%.

e) Potencial Energético del Sustrato

La estimación de potencial energético del sustrato se determinó en base al modelo matemático que se desarrollará en la siguiente sección 4.2.3, los valores de las variables para el cálculo del potencial energético tienen como sustento los resultados de los ensayos de laboratorio.

#### 4.2.3 Modelos Matemático de estimación del Potencial Energético

El modelo matemático desarrollado tiene como base a los modelos IPPC y de Bhattcharya, toma en cuenta la composición elemental de los residuos orgánicos, para estimar la cantidad de metano generado a partir del carbono orgánico. La descomposición del carbono orgánico se determina mediante la siguiente reacción:



Dónde:

$a$  = Sub índice de moles de carbono

$b$  = Sub índice de moles de hidrogeno

$c$  = Sub índice de moles de oxigeno

$d$  = Sub índice de moles de nitrógeno

El modelo presume que el metano generado es colectado sin pérdida y que el amoniaco generado es muy poco, por lo tanto, el poder energético es muy bajo y se considera despreciable. Por consiguiente, el cálculo de potencia se realiza tomando únicamente el poder energético del metano. La estructura del modelo se define según la expresión 4.2.

$$PE = (Mrso) \left( \frac{CH_4 \text{ Generado}}{Mrso \text{ Biodegradable}} \right) (PCI) \dots (4.2)$$

PE = Potencial Energético

$M_{rso}$  = La masa de RSO generado (toneladas /tiempo)

rso = residuo sólido orgánico

$$\frac{CH_4 \text{ Generado}}{Mrso \text{ Biodegradables}} = (FO). (FCB). (FCM) \dots (4.3)$$

FO = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos

FCB = Fracción de Carbono Biodegradable

FCM = Fracción de Carbono Biodegradable como Metano

PCI = Poder Calorífico Inferior del Metano (TJ/ton)

Por consiguiente, la expresión para el cálculo del potencial energético se expresa como:

$$PE = (Mrso) \left[ (FO). (FCB). (FCM) \left( \frac{16}{12} \right) \right] (PCI) \dots (4.4)$$

El factor 16/12 corresponde a la relación de la masa molar del metano (16g/mol) sobre la masa molar del carbono (12g/mol), lo que permite convertir la cantidad de carbono biodegradable en metano.

## Variables

- a) Fracción Orgánica de Residuo Sólido (FO): Esta variable depende de las propiedades físicas de la masa del residuo.
- b) Fracción Carbono Biodegradable (FCB): Esta variable es dependiente de las características químicas del residuo orgánico, para determinar esta variable se utiliza la siguiente expresión.

$$FCB = 0.83 - 0.28 \left[ \left( \frac{\%Lignina}{\%SV} \right) \right] \left[ \left( \frac{\%COT * \%ST}{10000} \right) \right] \dots (4.5)$$

%SV	= Sólido Volátil (Kg SV/Kg RSO)
%COT	= Carbono Orgánico Total (Kg COT/Kg RSO)
%ST	= Sólido Total (Kg ST/Kg RSO)

- c) Fracción de Carbono biodegradable como Metano (FCM): Esta variable es dependiente de las características fisicoquímicas, para su determinación es necesario aplicar el principio de biodigestión anaerobia, por medio de la expresión 4.6 A continuación, se describen los pasos del cálculo de los coeficientes estequiométricos para estimar la fracción de metano:
- Se toma como base el análisis elemental en porcentaje de peso de cada tipo de residuo, en ausencia de azufre;
  - Los subíndices se pasan a porcentajes molar, cada uno por sus respectivos pesos moleculares;
  - Los subíndices se dividen todos entre el porcentaje de nitrógeno para que la relación mol de nitrógeno sea igual a uno; y
  - Teniendo este coeficiente el factor se determina por la expresión 4.6.

$$A = \left( \frac{4a - b - 2c + 3d}{8a} \right); B = \left( \frac{4a + b - 2c - 3d}{8a} \right); C = \left( \frac{4a - b + 2c + 3d}{8a} \right) \dots (4.6)$$

Donde A son las moles de agua (H<sub>2</sub>O), B las moles de metano (CH<sub>4</sub>) y C las moles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de esta forma calcular la fracción de metano.

Las muestras de residuos asumidos para el proyecto fueron divididas en tres clases o sustratos, enviados al laboratorio para su análisis; la tabla 4.7 muestra los resultados obtenidos del análisis.

## Sustratos Analizados

### a) Sustrato 1 (S1)

Muestra de residuo fresco. - Consta de restos de frutas y vegetales, los cuales no han pasado por ningún tratamiento de cocción.

### b) Sustrato 2 (S2)

Muestra de residuo cocido o comida. - Está conformada por restos de comida (arroz, cascara de frutas, vegetales, guisos) y sopas.

### c) Sustrato 3 (S3)

Muestra de residuos mezclados o mezcla. - Conformados por las muestras del sustrato S1, S2 y restos de carnes y hueso.

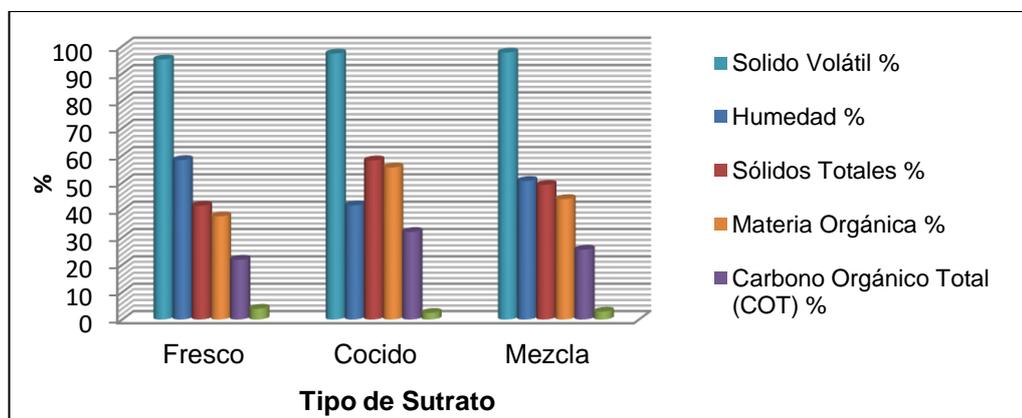
Durante la caracterización realizada, se enviaron tres muestras diarias (una por cada sustrato) durante cinco días, en la tabla 4.7 se presentan los resultados promedio por tipo de sustrato.

*Tabla 4.7.- Características fisicoquímicas por tipo de sustratos evaluados (ESCEGIS SRL 2013: 25)*

Nº	Característica Fisicoquímicas				
	Parámetro	Unidad	Sustratos		
			Fresco	Cocido	Mezcla
Análisis básico					
1	Densidad real	kg/m <sup>3</sup>	555.07	876.90	715.38
2	Humedad	%	58.36	41.77	50.71
3	Sólidos Totales	%	41.64	58.23	49.29
Análisis en base seca					
4	Material Volátil	%	73.00	35.99	42.67
5	Carbono Fijo	%	9.66	4.76	5.65
6	Cenizas	%	3.95	2.44	2.89
Análisis elemental en base seca					
7	Carbono Orgánico Total (COT)	%	21.93	32.06	25.56
8	Hidrogeno	%	2.88	4.12	3.35
9	Oxígeno	%	17.63	25.27	20.55
10	Nitrógeno	%	0.91	1.31	1.07
11	Azufre	%	0.09	0.13	0.11
Análisis bromatológico					
12	Aceites y Grasa	mg/kg	10672.50	47939.40	42584.00
13	Lignina	%	4.52	5.21	4.87
Otros parámetros					
14	Sólido Volátil	%	96.05	97.32	97.69
15	Masa de residuo orgánico	ton/mes	14.34	22.52	40.47
16	Materia Orgánica	%	37.78	55.66	44.08

El gráfico 4.5 presenta los principales parámetros químicos de los sustratos analizados.

Gráfico 4.5.- Principales parámetros químicos por sustratos analizados  
(ESCEGIS SRL 2013: 26)



#### Variables del potencial energético

Para determinar el potencial energético (PE) se aplicará la expresión 4.4; primero se realizará el cálculo del valor de sus variables FCB y FCM.

a) Fracción Carbono Biodegradable (FCB): Esta variable se determina a partir del análisis elemental de los sustratos (parámetro N° 3, 7, 13 y 14 de la tabla 4.5) obteniendo los valores de FCB (Ver tabla 4.8, 4.9 y 4.10), utilizando la Expresión 4.5.

Tabla 4.8.- Fracción de Carbono orgánico Biodegradable de residuos frescos  
(ESCEGIS SRL 2013: 26)

FCB PARA RESIDUOS FRESCOS		
% Sólidos Totales (ST)	=	41.64
% Carbono Orgánico Total (COT)	=	21.93
%Lignina	=	4.52
% Sólidos Volátiles (SV)	=	96.05
FCB	=	0.07

Tabla 4.9.- Fracción de Carbono orgánico Biodegradable de residuos cocido  
(ESCEGIS SRL 2013: 27)

FCB PARA RESIDUOS COCIDOS		
% Sólidos Totales (ST)	=	58.23
% Carbono Orgánico Total (COT)	=	32.06

%Lignina	=	5.21
% Solidos Volátiles (SV)	=	97.32
FCB	=	0.15

*Tabla 4.10.- Fracción de Carbono orgánico Biodegradable para residuos mezclados  
(ESCEGIS SRL 2013: 27)*

<b>FCB PARA RESIDUOS MEZCLADOS</b>		
% Solidos Totales (ST)	=	49.29
% Carbono Orgánico Total (COT)	=	25.56
%Lignina	=	4.87
% Solidos Volátiles (SV)	=	97.69
FCB	=	0.10

- b) Fracción Carbono biodegradable como Metano (FCM): Esta variable se determina a partir de la expresión 4.1, desarrollando los valores de los parámetros señalados en la expresión 4.6, la cual vincula el análisis elemental en base seca (parámetro N° 7, 8, 9 y 10 de la Tabla 4.5), obteniendo los valores para los tipos de sustrato mostrados en la tabla 4.11.

*Tabla 4.11.- Fracción de Carbono orgánico biodegradable como Metano  
(ESCEGIS SRL 2013: 27)*

<b>Sustrato</b>	<b>FCM</b>
Residuo Fresco	0.52
Residuo Cocido	0.51
Residuo Mezclado	0.51

- c) Fracción Orgánica (FO): Es una variable determinada en laboratorio (parámetro N° 16 de la tabla 4.5), en la tabla 4.12 se presentan los valores de la fracción orgánica.

*Tabla 4.12.- Fracción Orgánica biodegradable (ESCEGIS SRL 2013: 27)*

<b>Sustrato</b>	<b>FO</b>
Residuo Fresco	0.38
Residuo Cocido	0.56
Residuo Mezclado	0.44

d) Potencial Energético de Residuos Orgánicos: para determinar el Potencial Energético (PE) de los sustratos seleccionados, se debe realizar los cálculos con los valores obtenidos. A continuación, en las tablas 4.13, 4.14 y 4.15 se muestran el cálculo del potencial energético por tipo de sustrato analizado, se observa que el residuo cocido presenta el PE más alto (Ver Gráfico 4.6). La tabla 4.16, presenta los valores de conversión energética utilizados, la tabla 4.17 muestra la equivalencia energética de cada sustrato.

Tabla 4.13.- Potencial Energético de residuos frescos (ESCEGIS SRL 2013: 28)

Parámetro	Variable	Unidad	Expresión (Modelo Matemático)
Mrso	14.3400	Ton/mes	
FO	0.3800	Adimensional	
FCB	0.0700	Adimensional	Expresión 4
PCI CH4	0.0500	TJ/Ton	
FCM	0.5200	Adimensional	Expresión 1, 1a
PE	0.0144	TJ/mes	Expresión 3

Tabla 4.14.- Potencial Energético de residuos cocidos (ESCEGIS SRL 2013: 28)

Parámetro	Variable	Unidad	Expresión (Modelo Matemático)
Mrso	22.5200	Ton/mes	
FO	0.5600	Adimensional	
FCB	0.1500	Adimensional	Expresión 4
PCI CH4	0.0500	TJ/Ton	
FCM	0.5100	Adimensional	Expresión 1, 1a
PE	0.0670	TJ/mes	Expresión 3

Tabla 4.15.- Potencial Energético de residuos mezclados (ESCEGIS SRL, 2013: 28)

Parámetro	Variable	Unidad	Expresión (Modelo Matemático)
Mrso	40.4700	Ton/mes	
FO	0.4400	Adimensional	
FCB	0.1000	Adimensional	Expresión 4
PCI CH4	0.0500	TJ/Ton	
FCM	0.5100	Adimensional	Expresión 1, 1a
PE	0.0644	TJ/mes	Expresión 3

Gráfico 4.6.- Potencial Energético de los residuos sólidos orgánicos  
(ESCEGIS SRL 2013: 29)

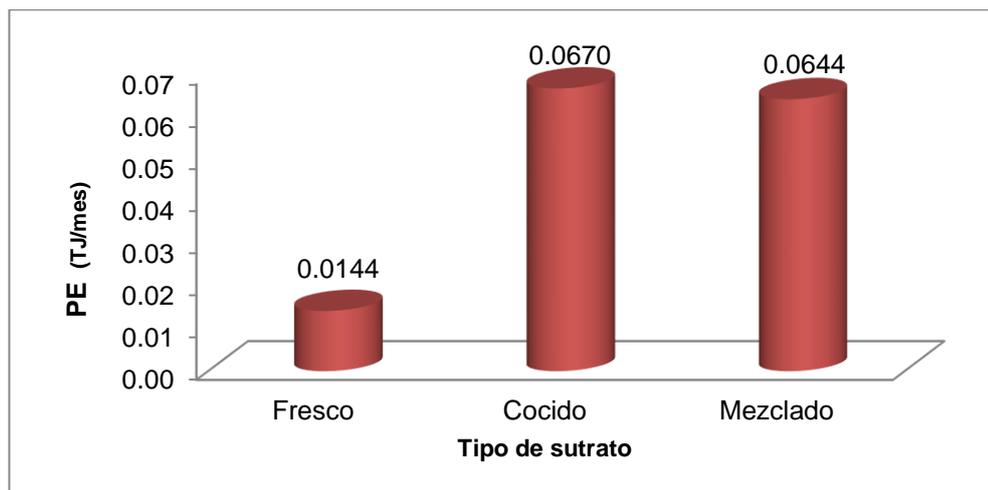


Tabla 4.16.- Valores de Conversión Energética (CONAE 2006)

Equivalencia			
TJ/h	1	MJ/h	1*10 <sup>6</sup>
MJ/h	1	kW/h	0.2778
kW/h	1	kcal	859.8500
Barril de petróleo	1	kW/h	1605
Litros de Petróleo	1	kW/h	10.0950

Tabla 4.17.- Equivalencia Energética de los sustratos frescos, cocidos y mezcla  
(ESCEGIS SRL 2013: 29)

Factor energético	Equivalencia		
	Frescos	Cocidos	Mezcla
Potencial Energético (TJ/mes)	0.014400	0.067000	0.064400
TJ/h	0.000019	0.000093	0.000089
MJ/h	19.992	93.017	89.489
kW/h	5.553	25.838	24.858
Litros de Petróleo (horas)	0.550	2.650	2.462

En la tabla 4.17, se observa que tratando 14.34 ton/mes de residuos frescos (S1) se obtiene 0.550 litros de petróleo por hora, tratando 22.52 ton/mes de residuos cocidos (S2) se obtiene 2.650 litros de petróleo por hora y tratando 40.47 ton/mes de residuos mezclados (S3) se obtiene 2.462 litros de petróleo por hora.

### Sustrato seleccionado para la producción de Biogás

Los restos de comida o residuos cocidos se destinarán a la producción de biogás, debido, a que generarían mayor potencial energético, como se ha mostrado en el Gráfico 4.6.

### Sustrato para la producción de Biogás

Del análisis del potencial energético, el sustrato que corresponde a residuos de comida o cocidos (S2) es el adecuado para ser biodigestado, generando aproximadamente 25.838kW/h. En la tabla 4.18, se muestra la equivalencia energética de los residuos cocidos expresados por día de biodigestión. Para la generación de biogás, se requiere un periodo de 60 días de arranque del sistema, luego del cual se puede generar 620.112 kW/día.

Tabla 4.18.- Equivalencia energética de los residuos de comida (S2)  
(ESCEGIS SRL 2013: 30)

Factor energético	Equivalencia
Potencial Energético (TJ/mes)	0.067000
TJ/día	0.002232
MJ/día	2232.408
kW/día	620.112
Litros de Petróleo (día)	63.60

### Sustrato para la producción de Compost

Del análisis realizado a las muestras seleccionadas para determinar la calidad de los residuos, y su potencial de generar biogás, se observó que el 35.46% de los residuos orgánicos, constituido por aquellos residuos frescos, no presenta un índice adecuado para la generación de biogás, por lo que es conveniente darle un manejo diferente, es decir, continuar con la producción de compost, pero teniendo en cuenta nuevos procedimientos y consideraciones que se detallarán en la sección de compost.

### 4.3 Diseño de Planta de Biogás

Para el diseño de la planta de generación de biogás por digestión anaerobia, a partir de los residuos de comida o cocidos, se consideró el volumen, densidad, características fisicoquímicas del sustrato, y parámetros que forman parte del diseño del biodigestor, los que se describen a continuación:

- a. Tamaño del residuo
- b. Cantidad de carga recomendada
- c. Concentración de sólidos
- d. Temperatura del residuo
- e. Dilución del residuo sólido volátil

#### 4.3.1 Recepción, Pre Tratamiento y Manejo del Sustrato

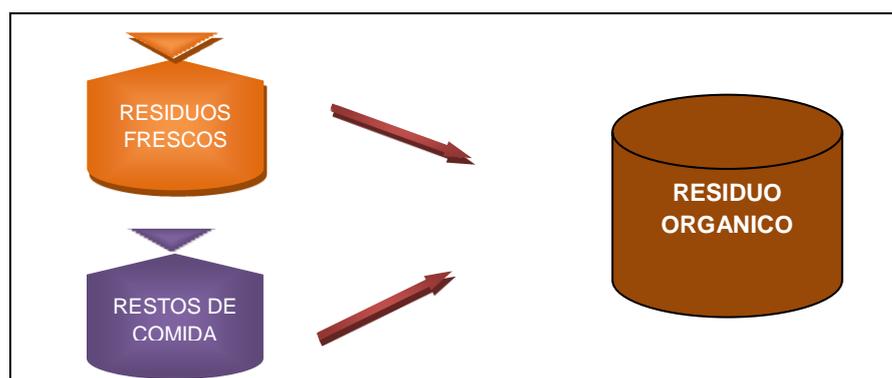
El proceso de digestión anaerobia de residuos cocidos en una planta de producción de biogás, requiere de un tratamiento previo del sustrato, cuyo objetivo, es aumentar la biodegradabilidad de los mismos y disminuir el tiempo de residencia, otro término es tiempo de retención este es la cantidad de tiempo que un líquido permanece en un recipiente. El tiempo de residencia asegura que se haya alcanzado el equilibrio entre el líquido y el gas a presión del separador. La unidad minera, cuenta con puntos de segregación de residuos, para lo cual se tiene en cuenta los componentes a segregar.

Los puntos de acopio de comedor cuentan con cilindros de colores en los cuales se colocan los residuos acondicionados en bolsas de colores negro u otros colores, no pudiéndose diferenciar su contenido luego de la recolección, por este motivo es óptimo colocar los residuos en bolsas de colores, ayudando a diferenciar los residuos segregados luego de la recolección y poder ser destinados a su aprovechamiento y disposición final según sus características.

##### a) Residuos Orgánicos

- Residuo fresco: Estos residuos serán acondicionados en bolsas de color anaranjado y almacenadas en los cilindros de color marrón.
- Restos de comida: Los residuos de comida serán acondicionados en bolsas de color morado y almacenadas en los cilindros de color marrón. En el gráfico 4.7 se muestra el almacenamiento de residuos orgánicos.

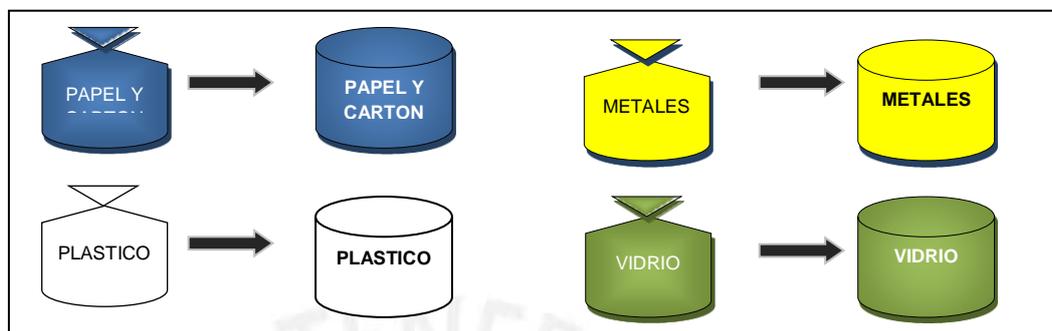
Gráfico 4.7.- Almacenamiento de residuos orgánicos por colores de bolsa



b) Residuos Inorgánicos

Los residuos inorgánicos serán almacenados según el color de cilindro que correspondan, como se muestra en el gráfico 4.8.

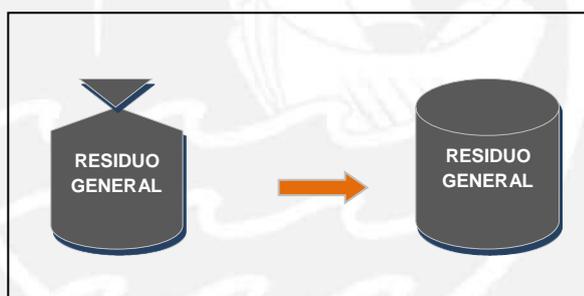
Gráfico 4.8.- Almacenamiento de residuos inorgánicos



c) Residuos Generales

Los residuos generales serán acondicionados en bolsas negras, y colocado en los cilindros negros (Ver gráfico 4.9).

Gráfico 4.9.- Almacenamiento de residuos generales



Para la recepción y manejo del sustrato, se sigue un procedimiento de segregación de residuos que se muestra a continuación:

**Segregación de residuos**

a) Segregación de residuos orgánicos

Los residuos producto de la labor de cocina deber ser acondicionados en bolsas de color anaranjado, debido a que por lo general contendrán cascara de frutas y vegetales (residuo fresco).

Al término del servicio de alimentación a los comensales, los residuos generados serán recepcionados en bandejas, las cuales serán llevadas a la zona de cocina en donde el personal encargado realizará la segregación, colocará los residuos de comida en bolsas moradas, teniendo consideraciones de que los restos de

comida no deberá contener residuos como, servilletas húmedas o vasos descartables que comúnmente son recepcionados en conjunto con las bandejas. Asimismo, la comida no servida a los comensales, deberá ser acondicionada en bolsas moradas (residuos cocidos) y en caso de frutas o alimentos no cocidos en bolsas anaranjadas. Ambos colores de bolsas serán colocados en dentro de los cilindros marrones, para su recolección debido a que pertenecen a una misma categoría.

b) Segregación de residuos inorgánicos y generales

Los residuos inorgánicos deben ser colocados en los colores de bolsas según su composición. Es importante señalar que el uso correcto del color de bolsa servirá para mantener los residuos segregados hasta su recolección.

### **Pre tratamiento Mecánico**

Procedimiento que consiste en reducir el tamaño del diámetro de la partícula del sustrato entre 6 y 9 milímetros aproximadamente, aumentando así la superficie específica del biodigestor, de manera que se consiga una mayor solubilización de la materia orgánica contenida en el sustrato y una mayor biodisponibilidad de la materia orgánica.

De esta manera la relación entre el tamaño del sustrato versus área que ocupa es lineal, se puede indicar, a medida que aumenta la superficie específica del biodigestor, aumenta la capacidad de producción de biogás.

### **Manejo del Sustrato**

El manejo del sustrato triturado, seguirá las siguientes actividades:

- a. El sustrato triturado será depositado en la primera poza, antes del ingreso al biodigestor, donde se le añadirá agua con temperatura ambiente y agua caliente solar, obteniendo una mezcla con una temperatura entre 21 °C y 27 °C, Para garantizar el rango de la temperatura, la descarga de agua deberá ser entre las 14:00 y 16:00 horas.

Teniendo como base una temperatura ambiente de 17 °C:

- Para obtener una mezcla con temperatura de 21 °C, se le añadirá 173L de agua con temperatura de 45 °C (agua obtenida de la terma solar) y 1113 L de agua a temperatura ambiente 17 °C.

Compuesto	Temperatura (°C)	Volumen (L)
Agua con temperatura ambiente	T <sub>1</sub> = 17 14.8	V <sub>1</sub> = 1 113
Agua caliente solar	T <sub>2</sub> = 45 40	V <sub>2</sub> = 173
Agua de Mezcla	T <sub>f</sub> =20.766718	V <sub>f</sub> = 1286
Ecuación de temperatura de equilibrio		$T_1 \times V_1 + T_2 \times V_2 = T_f \times V_f$

- Para obtener una mezcla con temperatura de 27 °C, se le añadirá 173 L de agua con temperatura de 90 °C (agua obtenida de la terma solar) y 1113 L de agua a temperatura ambiente 17 °C.

Compuesto	Temperatura °(C)	volumen (L)
Agua con temperatura ambiente	T <sub>1</sub> = 17	V <sub>1</sub> = 1 113
Agua caliente solar	T <sub>2</sub> = 90 80	V <sub>2</sub> = 173
Agua de Mezcla	T <sub>f</sub> =26.820373	V <sub>f</sub> = 1 286
Ecuación de temperatura de equilibrio		$T_1 \times V_1 + T_2 \times V_2 = T_f \times V_f$

La relación a utilizar de masa/agua, es por cada 751 kg de sustrato se utilizará un volumen de 1.28 m<sup>3</sup> de agua.

El agua a utilizar en el proceso de digestión anaerobia, debe tener concentraciones de sales menores a 40mg/litro, debido que el cloruro de sodio es un inhibidor de la biodigestión.

- El sustrato mezclado se conduce mediante una tubería de PVC al biodigestor, donde se degradará la fracción orgánica en metano (CH<sub>4</sub>).

El biol obtenido, será derivado a un reservorio, que se ubica después del biodigestor para su posterior aprovechamiento. (Marti 2011)

#### 4.3.2 Producción de Metano

Entre los factores a considerar para el proceso metanogénico, está la relación Carbono -Nitrógeno (C/N), que sirve como nutriente para las bacterias, el sustrato seleccionado (residuos cocidos o comida) presenta la relación C/N de 24:1 (Carbono 32.06 % y Nitrógeno 1.31 %).

El crecimiento bacteriano se realiza en condiciones anaerobias, para mejorar y acelerar el crecimiento es recomendable ingresar un inóculo (microorganismo), por ejemplo, excretas de ganado ovino (chivos) las cuales deberán ser provistas en la

etapa de arranque de los biodigestores (1 Kg por cada biodigestor) asegurando así la producción de biogás.

La variación del pH, es un indicador de la producción de bacterias, si el sustrato se va gasificando se puede saber en qué etapa de la digestión anaerobia se encuentra dentro del biodigestor. La tabla 4.19, muestra los intervalos de pH de las etapas de la digestión anaerobia.

*Tabla 4.19.- Valores de pH en las etapas de la biodigestión (MONARCA 2014: 35)*

<b>Etapas</b>	<b>pH</b>
Hidrolisis	5.2-6.3
Acidogénesis	6.6-6.8
Metalogénesis	6.7-7.5

### **Tamaño de Cámara de digestión**

En base a la caracterización de los residuos orgánicos, se registró una generación de 22.52 ton/mes de residuos cocidos o comida (S2), este volumen es utilizado para el cálculo de las dimensiones de la cámara de digestión.

Las dimensiones de la cámara de digestión de otras variables como: porcentaje de dilución y densidad de los residuos. En base a estas variables físicas y químicas se determinó la capacidad de la cámara de biodigestión, la cual debe determinar el volumen total de 89 m<sup>3</sup>. La tabla 4.20, muestra las variables utilizadas para determinar el volumen de la cámara de digestión.

*Tabla 4.20.- Volumen de la cámara de digestión (ESCEGIS SRL 2013: 40)*

<b>Variable</b>	<b>Valor (m<sup>3</sup>)</b>
Volumen ocupado por el sustrato diluido (residuo más agua)	64.203
Volumen libre para biogás	11.330
Volumen para materiales no degradados (biosol)	0.364
Volumen de arranque	12.841
<b>Volumen Total</b>	<b>88.738</b>

Para optimizar el proceso de biodigestión, se deberán construir 7 cámaras de 12,7 m<sup>3</sup> de capacidad, cada cámara tendrá una capacidad de carga de 9.17 m<sup>3</sup> de sustrato diluido. La tabla 26, muestra las variables utilizadas para determinar el volumen de cada cámara de digestión.

Tabla 4.21.- Volumen requerido por biodigestor (ESCEGIS SRL 2013: 40)

Variable	Valor (m <sup>3</sup> )
Volumen ocupado por el sustrato diluido (residuo más agua)	9.172
Volumen libre para almacenamiento de biogás	1.619
Volumen para materiales no degradados (biosol)	0.052
Volumen de arranque	1.834
Volumen Total	12.677

Luego del arranque del sistema, se deberá alimentar diariamente a cada biodigestor, la tabla 4.22 muestra el volumen del material ingresante a cada cámara de digestión.

Tabla 4.22.- Composición del sustrato ingresante a cada cámara de digestión (ESCEGIS SRL 2013:40)

Parámetro	Valor	Unidad
Afluente de agua	1.28	m <sup>3</sup> /día
Volumen de residuo cocido	0.86	m <sup>3</sup> /día
Volumen Total	2.14	m <sup>3</sup> /día

La retención hidráulica, está en función a la generación y la capacidad mensual del biodigestor, de acuerdo al diseño, cada biodigestor tiene una capacidad de 15.75 m<sup>3</sup>, el volumen de sustrato diluido ingresado es de 12.67 m<sup>3</sup>/mes, lo cual deja una capacidad extra de 3.08 m<sup>3</sup> en cada biodigestor.

### **Tecnología Seleccionada**

Existen diferentes tecnologías para obtener energía mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos, de acuerdo al análisis realizado de los sustratos, se estableció que el sistema continuo, es el más adecuado. Este sistema, permite alimentar diariamente al biodigestor y generar una producción continua de biogás luego del arranque del sistema.

### **Sistema Continuo**

Luego del arranque, el sistema puede ser cargado diariamente por gravedad, con un volumen de sustrato definido, produciendo cantidades diarias constantes si se mantienen las condiciones de operación, el sistema continuo, permite realizar descargas entre los 12 y 24 meses.

El tiempo de permanencia del biosol dentro del biodigestor está determinado por el volumen de la cámara de digestión y el volumen de la carga diaria. La formación de biosol es de 4.37 m<sup>3</sup>/anual por cada biodigestor, permitiendo el funcionamiento del mismo por un año, luego del cual se deberá iniciar un nuevo arranque del sistema, la 4.23 muestra los volúmenes a considerar para el nuevo arranque. (MARTI 2011)

*Tabla 4.23.- Volúmenes de arranque para cada biodigestor  
(ESCEGIS SRL 2013: 41)*

Parámetros	Valor	Unidad
Volumen utilizado por biodigestor		
Volumen de Cámara	12.6770	m <sup>3</sup>
Volumen ocupado por el sustrato diluido	9.1719	m <sup>3</sup>
Periodo de llenado de cámara		
Volumen de sustrato diluido	2.1400	m <sup>3</sup> /día
Tiempo de llenado de cámara	4.2857	días
Volumen de biosol	0.0121	m <sup>3</sup> /día
Volumen de biosol anual	4.3708	m <sup>3</sup> /año
Periodo de descarga 12 meses		

### Equipos

a) Biodigestor: es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar con determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos. El biodigestor es un sistema conformado por una poza de entrada, un reservorio de biol y tuberías.

Para biodigestar el sustrato seleccionado, es necesario una cámara con capacidad de 88.739 m<sup>3</sup>, es por ello que construir un único biodigestor de gran volumen no es recomendable, debido a que extiende el tiempo de degradación del residuo, reduciendo la eficiencia del proceso, por lo tanto, se deben construir 7 biodigestores de 12.67 m<sup>3</sup> de capacidad, la tabla 4.24 describe las especificaciones técnicas de los reactores a construir.

*Tabla 4.24.- Especificaciones técnicas por biodigestor (reactor)  
(ESCEGIS SRL 2013:42)*

<b>Material</b>	Paredes de ladrillo y cemento, impermeabilización con cemento o cerámica
<b>Modelo</b>	Tipo chino enterrado, permite mezcla del lodo en el interior
<b>Duración</b>	Tiempo de vida aproximado de 20 a 30 años
<b>Dimensiones</b>	3 m de alto X 1.5 m de radio
<b>Volumen de almacenamiento</b>	9.17 m <sup>3</sup>
<b>Volumen del biogás</b>	1.61 m <sup>3</sup>
<b>Volumen Total</b>	15.75 m <sup>3</sup>

En el Anexo A, se adjunta la figura 01, que muestra el diseño de los biodigestores. Asimismo, en el Anexo B se presenta los costos de los materiales requeridos.

b) Reservorio de Biol: la producción de biol en el sistema será constante debido a la frecuencia de ingreso del sustrato, por lo mismo es necesario construir un reservorio de biol por cada biodigestor, la tabla 4.25 describe las especificaciones técnicas del reservorio.

*Tabla 4.25.- Especificaciones técnicas del reservorio de biol  
(ESCEGIS SRL, 2013: 42)*

<b>Agitación</b>	Sistema de agitación manual
<b>Material</b>	Paredes de ladrillo y cemento
<b>Forma</b>	Cilíndrica
<b>Medidas</b>	Altura 2.5m, Radio 0.75 m. Volumen de 4.41 m <sup>3</sup>
<b>Borde</b>	0.20 m

c) Poza de entrada: es utilizada para mezclar proporciones definidas de sustrato triturado y agua, para alimentar al biodigestor. La poza de entrada tendrá un volumen de carga de 1.41 m<sup>3</sup>. La tabla 4.26, describe las especificaciones técnicas del equipo.

*Tabla 4.26.- Especificaciones técnicas de la poza de entrada  
(ESCEGIS SRL 2013: 43)*

<b>Agitación</b>	Sistema de agitación manual
<b>Material</b>	Paredes de ladrillo y cemento
<b>Forma</b>	Cilíndrica
<b>Medidas</b>	Altura 1.25m, Radio 0.6m. Volumen de 1.41 m <sup>3</sup>
<b>Borde</b>	0.20 m

d) Cámara de almacenamiento de biogás: la producción de biogás del biodigestor es continua, no ocurre lo mismo con el consumo, que por lo general está concentrado en una fracción corta de tiempo. Por este motivo, será necesario almacenar el biogás producido durante las horas en que no se consuma. Se construirá una cámara con geomembrana de PVC, la tapa ubicada en el centro será construida con niples de PVC de 1" x 15 cm para la salida de biogás, la cual estará fijada con empaquetaduras de jebe y dos arandelas de PVC de 10 cm de diámetro. La tabla 4.27, describe las especificaciones técnicas del equipo.

*Tabla 4.27.- Especificaciones técnicas de la cámara de almacenamiento  
(ESCEGIS SRL 2013: 43)*

<b>Material</b>	PVC de 0.6 mm
<b>Medidas</b>	Ø 2 m x 5 m de largo
<b>Tapas</b>	Dos tapas en los extremos y una sobre el centro superior
<b>Protección</b>	Invernadero
<b>Capacidad</b>	15,7 m <sup>3</sup>

Para mayor detalle ver Figuras 02 y 03 del Anexo A.

e) Picadora: El sustrato debe ser triturado antes de ingresar al proceso de biodigestión, para este proceso se usará una picadora de modelo PN PLUS 2000, adquirida por la unidad minera en el año 2012, la tabla 4.28 describe las especificaciones técnicas del equipo.

*Tabla 4.28.- Especificaciones técnicas de la picadora  
(Unidad Minera, 2016: 43)*

<b>Modelo</b>	PN PLUS 200
<b>Cuchillas</b>	3
<b>Producción</b>	500 a 2500 kg/hora
<b>Rotación de Rotor</b>	2200 rpm
<b>Consumo de combustible</b>	1 l/h
<b>Motor Eléctrico</b>	13 HP

f) Terma de colectores de tubo: el agua ingresada a la poza de entrada, deberá mantener una temperatura entre 21 °C y 27°C, por lo cual será necesario adquirir una terma solar modelo LTV-200, con capacidad de 200 litros. La tabla 4.29 describe las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 4.29.- Especificaciones técnicas de la terma solar  
(Liders SAC, 2016)

<b>Modelo</b>	LVT-200
<b>Temperatura de trabajo</b>	-20° C /99° C
<b>Diámetro del deposito</b>	360 mm
<b>Longitud interior del deposito</b>	1700 mm
<b>Capacidad</b>	200 litros
<b>Temperatura en días nublados</b>	45°C
<b>Temperatura en días soleados</b>	>90 ° C

### Procesos de la Biodigestión

a) Arranque, operación y descarga de los biodigestores

#### Proceso de Arranque

El proceso de arranque, involucra el llenado y la biodigestión del sustrato diluido en el reactor, requiere un ambiente estrictamente anaeróbico y completamente impermeabilizado, en razón a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno.

Para el diseño del sistema de Biodigestores, no se cuenta con un sistema térmico que permita regular la temperatura dentro de cada biodigestor, por tanto, el sistema se denominaría mesófilo, y su proceso de arranque, de cada reactor, tendrá una duración de 30. Sin embargo, los reactores al encontrarse enterrados, mantendrán una temperatura constante de 45°C no permitiendo que alcance valores mayores a 60°C. La tabla 4.30 muestra diferencias básicas del sistema mesófilo y termófilo.

Tabla 4.30.- Características del sistema mesófilo vs termófilo  
(MONARCA 2014: 38)

<b>Característica</b>	<b>Mesófilo</b>	<b>Termófilo</b>
Temperatura	30-45°C	55-60°C
Tiempo de residencia	30-60 días	12-20 días
Costo	Menor	Mayor

En el proceso de arranque, tendrá una duración de 30 días, los primeros 5 o 6 días se realizará el llenado con sustrato diluido, los siguientes 24 o 25 días se suspenderá el llenado para permitir que la población bacteriana metanogénica comience a crecer y el proceso de biodigestión se estabilice.

- Primer reactor: será llenado en 5 días y se suspenderá la carga por los siguientes 25 días.
- Segundo reactor: el llenado durará 5 días, tomando como punto de partida el quinto día de llenado del primer reactor y se suspenderá la carga por los siguientes 25 días.
- Tercer reactor: el llenado durará 5 días, tomando como punto de partida el quinto día de llenado del segundo reactor y se suspenderá la carga por los siguientes 25 días.
- Cuarto reactor: el llenado durará 6 días, tomando como punto de partida el quinto día de llenado del tercer reactor y se suspenderá la carga por los siguientes 24 días.
- Quinto reactor: el llenado durará 5 días, tomando como punto de partida el sexto día de llenado del cuarto reactor y se suspenderá la carga por los siguientes 25 días.
- Sexto reactor: el llenado durará 5 días, tomando como punto de partida el quinto día de llenado del quinto reactor y se suspenderá la carga por los siguientes 25 días.
- Séptimo reactor: el llenado durará 6 días, tomando como punto de partida el quinto día de llenado del sexto reactor y se suspenderá la carga por los siguientes 24 días.

El último día del proceso de arranque de cada reactor, se descargará el biogás producido.

Para sostener la biodigestión en el proceso, se ingresará sustrato diluido a cada reactor tomando como referencia los días de llenado descritos anteriormente. Los volúmenes ingresados tendrán la relación de 3:2 entre el agua (1.28 m<sup>3</sup>) y el sustrato triturado (0.86 m<sup>3</sup>).

El arranque del sistema de reactores requiere un total de 60 días, en el Anexo C, se presenta el Cronograma de Arranque, Operación y Descarga.

### **Proceso de Operación**

El proceso de operación se inicia luego del arranque del sistema de reactores, por un periodo de 12 meses, durante este tiempo se ingresará el total del sustrato diluido a cada reactor por día, permitiendo la producción continua de biogás y una descarga periódica del sistema cada 15 días. La eficiencia de la producción estará sujeta a un ambiente estrictamente anaeróbico y completamente impermeabilizado.

### **Proceso de Descarga**

El proceso de descarga consiste en la interrupción del llenado de los reactores por periodos de 26 o 28 días, extrayendo en los dos últimos días el biosol. Luego de la descarga, se iniciará nuevamente el arranque del sistema. La tabla 4.31, muestra los parámetros a considerar para el desarrollo de la biodigestión.

*Tabla 4.31.- Parámetros del proceso de la biodigestión  
(ESCEGIS SRL 2013: 46)*

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de arranque		
Tiempo de llenado	5 o 6	días
Tiempo de crecimiento bacteria	24 o 25	días
Tiempo de operación		
Tiempo de operación	12	meses
Intervalo de descarga de biogás	15 a 20	días
Tiempo de descarga		
Tiempo sin carga de sustrato	26-28	días

El proceso de operación tiene una duración de 12 meses, ya que los reactores tienen capacidad suficiente para que no presenten problemas de acumulación de residuos permanentes. Este periodo depende del manejo de cada biodigestor, debido a que la materia podría solidificarse dentro del reactor, no permitiendo realizar cargas continuas y disminuyendo el periodo del proceso de operación.

b) Volumen de Ingreso

El volumen diario de sustrato diluido (2.14 m<sup>3</sup>), se iniciará luego del proceso de arranque del sistema de reactores. Para mantener un sistema eficiente y conocer la carga mensual del reactor, se debe realizar un registro controlando el volumen de llenado diario. La tabla 4.32 muestra las características del ingreso diario del sustrato diluido al sistema de biodigestión.

*Tabla 4.32.- Características del ingreso del sustrato diluido  
(ESCEGIS SRL, 2013: 46)*

Característica	Valor	Unidad
Residuo de cocido o comida		
Volumen de sustrato	0.86	m <sup>3</sup> /día
Peso de sustrato	751	Kg/día
Temperatura	15 - 25	°C
Agua		
Volumen de agua	1.28	m <sup>3</sup> /día
Temperatura	25	°C
Volumen total	2.14	m <sup>3</sup> /día

En la Figura 4 del Anexo A, se muestra el balance de masa luego del proceso de arranque del sistema de reactores.

#### c) Acondicionamiento del Biogás

El volumen de biogás generado en cada reactor durante el proceso de operación, ocupará aproximadamente el 15% de su capacidad ( $1.6 \text{ m}^3$ ). La descarga del biogás por reactor se realizará cada 15 o 20 días, almacenándose en una cámara de geomembrana de PVC de 0.6 mm, acondicionada sobre una base de plástico.

La producción de biogás del sistema de reactores será continua a lo largo del día, se calcula que el volumen de biogás almacenado será suficiente para ser utilizado en un motor o un quemador.

Para el adecuado almacenamiento de biogás, se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- El biogás debe ser manejado como cualquier otro gas combustible, considerando que una mezcla de biogás con aire en una relación de 1:20 forman un gas detonante altamente explosivo.
- Se debe tener cuidado con las tuberías de transporte de gas, verificando que no tengan fugas.
- A mayor longitud de la tubería que transportará el gas, mayor será la caída de presión, haciéndose necesario adaptar a la línea un soplador.

#### d) Área de implementación de la planta de producción de biogás

La planta de producción de biogás, está conformada por pozas de entrada, biodigestores, reservorios de biol, cámara de almacenamiento de biogás, picadora, quemador y motor, para la implementación de estos componentes se utilizará un área de 18x18 metros ( $324 \text{ m}^2$ ).

La picadora, el motor y el quemador, serán usados durante 1 hora por cada  $5 \text{ m}^3$  de biogás, al término de su uso serán almacenados en las edificaciones construidas en el micro relleno sanitario.

#### e) Control de Sistema de Biodigestores

Para optimizar la producción de biogás, se debe tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Temperatura

Para el óptimo funcionamiento del biodigestor, se deberá mantener y verificar que la temperatura se encuentre entre los  $45^\circ\text{C}$  y  $60^\circ\text{C}$ .

- pH

Para obtener una alta degradación del sustrato diluido y la concentración de metano (51%), el pH se debe mantener entre 6,5 y 7,5 (visto en el capítulo II). La medición de la temperatura y pH se realizará diariamente tomando una muestra de biol, se utilizarán equipos que se mencionarán más adelante.

- Control de producción de biogás

La producción continua y estable de biogás, dependerá del ritmo de alimentación, el tipo de biomasa y las condiciones operativas.

- Presión en el Biodigestor

Se controlará la presión de cada reactor, implementando un barómetro rural, formado por una botella de plástico transparente, con un volumen de agua que alcance de 7 a 9 cm de alto.

La función del barómetro rural es controlar la presión en el reactor, para evitar la ruptura.

- Deterioro de equipos

Los valores reportados según el modelo matemático aplicado, muestran que se producirá un biogás con una composición de:

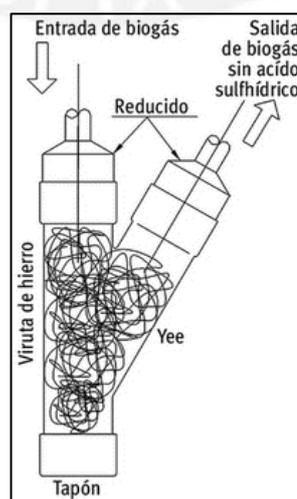
Metano: 50.9461 %

Otro: 0.0001%

Dióxido de Carbono: 49.0538%

El ácido se encuentra dentro del 0.0001% de la composición del biogás, por lo tanto, siendo su valor insignificante, pese a ello es necesario colocar trampas de óxido de hierro, las cuales se construirán introduciendo viruta de hierro dentro de la tubería de salida del biogás, como se muestra en el gráfico 4.10. Se deberá revisar cada 15 días el estado de la viruta, de manera que se drene el condensado acumulado (sulfato de hierro), retirando la viruta de hierro por el tapón.

Gráfico 4.10.- Trampa de óxido de hierro



Mediante este método los equipos no sufrirán daño por lo corrosivo de este impuesto.

- Inhibidores de producción de biogás

La presencia de metales pesados y otros elementos en determinadas concentraciones, pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo del sustrato. La tabla 4.33, muestra los rangos de la concentración de los principales inhibidores de la producción de biogás.

Tabla 4.33.- Inhibidores de la producción de biogás (Guevara 1996: 80)

Inhibidores	Concentración	Unidad
Óxido de azufre	5000	ppm
Cloruro de sodio	40000	ppm
Nitrato	0.05	mg/ ml
Cobre	100	mg/ l
Níquel	200-500	mg/ l
Sodio	3500 - 5500	mg/ l
Potasio	2500 - 4500	mg/ l
Calcio	2500 - 4500	mg/ l
Magnesio	1000 - 1500	mg/ l

Si se reduce la producción de biogás o se inhibe totalmente, se deberá verificar los niveles de pH y temperatura en el tanque de almacenamiento de biol, de encontrarse los niveles dentro de los rangos establecidos, será necesario tomar una muestra para el análisis de la concentración de compuestos inhibidores como el cloruro de sodio y calcio.

f) Control de productos de la Biodigestión

- Efluente líquido o biol

El biol del proceso de biodigestión, se derivará a los reservorios de 4.4 m<sup>2</sup> de capacidad (uno por cada biodigestor).

El biol podrá ser utilizado como biofertilizante o ser recirculado para la formación del sustrato diluido.

Para ser utilizado como biofertilizante, debe tomarse en cuenta la capacidad de infiltración del suelo y que los nutrientes se pierden luego de 7 días de haber sido generado. Se recomienda usarlo como máximo dos semanas después de generado.

Para recircular el biol, es necesario realizar un monitoreo para verificar que la concentración de sólidos totales sea menor al 15%, de lo contrario, no es recomendable su uso. (GUEVARA, 1996, 80)

- Efluente semisólido o biosol

Debido al alto contenido de sólido volátil del sustrato diluido, la generación del biosol será baja, teniendo una carga anual de 3.82 ton (0.545 ton por reactor).

El grado de descomposición y nutrientes como fósforo y nitrógeno del biosol resultante, permite que sea usado en la producción de compostaje sin ningún problema.

#### 4.4 Producción de Compost

##### 4.4.1 Condiciones del área y localización

El 23% (120 ton/año) del total de los residuos generados por los comedores y cocinas es aprovechado para la producción de compost.

###### a) Condiciones del área

Actualmente el área de compostaje tiene un área que abarca alrededor de 408 m<sup>2</sup>, la cual está conformada por una plataforma de concreto y cercada con una malla metálica de protección. Los lixiviados generados son transportados a través de una canaleta hasta un tanque de almacenamiento de 1m<sup>3</sup> de capacidad

###### b) Características de la zona

- Clima

Temperatura: esta se encuentra entre 19.2 y 19.8 °C, oscilando a 30°C y temperaturas promedios de 12°C y 18°C a 3200 y 2500 m.s.n.m. La temperatura en el área minera varía de 14 °C a 18.5 °C con un promedio diario de 15.7 °C. Las temperaturas mayores se registran entre las 12 y 14 horas y las mínimas entre las 2 y 4 de la mañana.

El comportamiento de la temperatura durante el segundo trimestre es bastante similar a la de la estación de verano, tanto en el comportamiento de la curva durante todo el día, así como de los niveles alcanzados. Para el caso del tercer trimestre, la temperatura en términos generales se incrementa en 2°C y mantiene la misma variación durante el día que las observadas en los meses anteriores. Existen cerca de 7 estaciones meteorológicas en los alrededores de las operaciones y área de influencia.

Humedad Relativa: este parámetro durante la estación de verano varía de 70 a 86%, con un promedio de 79.65%, alcanzando el menor valor durante las horas del día (12

horas del día) y la máxima humedad durante las horas de la noche, especialmente de 20:00 a 24:00 de la noche, con valores cercanos al 90% de humedad. Durante los meses de Abril a Junio, la humedad disminuye en el orden de 8 unidades respecto a la estación de verano y se acentúan los mínimos alcanzando 59% y los máximos 91%.

Presión Atmosférica: entre los años del 2001 y 2011 se presenta un valor máximo de 871.1 mm de Hg y un valor mínimo de 390.4 mm de Hg.

#### 4.4.2 Procedimiento

La persona responsable del traslado y manipulación de las bolsas llenas con residuos sólidos segregados debe utilizar tapabocas, guantes y botas antideslizantes de caucho, las cuales debe lavar y/o desechar antes de volver al servicio.

##### a) Recolección de residuos orgánicos

Previa selección en la fuente (comedores y zona de cocina), para esto se tendrán las siguientes consideraciones para la recolección de residuos orgánicos.

*Tabla 4.34.- Consideraciones de la recolección de residuos sólidos orgánicos*

N° de personal	Procedimientos
1 conductor 2 ayudantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar las bolsas del color correspondiente a los residuos frescos de cada establecimiento.</li> <li>- Retirar las bolsas de cada uno de los cilindros y colocarlos en el camión diferenciándolos de las bolsas que contengan restos de comida.</li> </ul>

##### b) Transporte

Una vez recolectados, los residuos serán transportados hacia el área del relleno sanitario, donde se encuentran las instalaciones de compostaje.

##### c) Recepción

Se deberá verificar que se recepción en los residuos sólidos destinados el compostaje y disponerlos en un área donde se pueda acumular mientras 2 operarios verifican cada una de las bolsas recolectadas y extraer el material no compostable y almacenarlos en el área correspondiente.

##### d) Trituración

Previo al proceso de compostaje, es necesario reducir el tamaño del sustrato seleccionado para favorecer la descomposición de una correcta mezcla de materiales para una mejor estructura, para ello es necesaria la implementación de una máquina trituradora.

Para ello se necesita seguir los siguientes pasos y controles mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4.35.- Consideraciones para la trituración de residuos

N° DE PERSONAL	PROCEDIMIENTOS	CONTROLES
2 operarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conducir los residuos hacia el triturador.</li> <li>- Recepcionar el material triturado para posteriormente compostarlo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Considerar que el diámetro adecuado de los residuos sólidos es entre 10 – 20 mm de diámetro, ya que inferiores a esta tienden a compactarse.</li> <li>- Ver Anexo 1 cotización del equipo.</li> </ul>

e) Compostaje

En esta etapa es donde ocurre el proceso de transformación de la materia prima de compost, teniendo en cuenta lo siguiente:

Dimensiones de la pila: es recomendable que la relación entre el ancho y la altura de las pilas sea 2:1, las cuales no deberán ser muy pequeñas para evitar que los parámetros sean incontrolables, por lo que deberán ser de 2 m de ancho por 1 m de alto y la longitud de acuerdo a la disponibilidad del espacio y de los residuos a compostar (ver tabla 4.36).

De los datos obtenidos del estudio de caracterización tenemos que diariamente se genera un promedio de 478.307 kg de residuo sólido fresco, con una densidad promedio de 555.07 kg/m<sup>3</sup> lo que ocupa en un mes 25.85 m<sup>3</sup> (ver tabla 4.37).

Tabla 4.36.- Dimensiones de la pila de compostaje

Dimensiones de la pila de compostaje		
Altura	1	m
Ancho	2	m
Longitud	3	m
Volumen	3	m <sup>3</sup>

Tabla 4.37.- Volumen de residuos generados

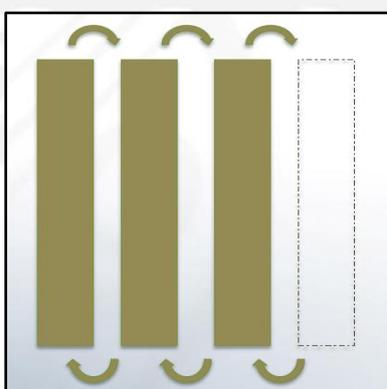
Dimensiones de la pila de compostaje		
Altura	1	m
Ancho	2	m
Longitud	3	m
Volumen	3	m <sup>3</sup>

Considerando las dimensiones de la pila se tiene que para una longitud de 3 m, esta alberga 3 m<sup>3</sup>, por lo que el total de residuos generados en un mes necesitarían de aproximadamente 9 (8.6) pilas para su procesamiento, considerando un periodo de maduración de 60 días, se necesitarían un total de 18 pilas, lo que requiere un área aproximada de 300 m<sup>2</sup> (considerando 1 m de separación entre pilas y un ancho de 1.5 m de las rejillas de drenaje de líquidos), considerando una distribución de pilas como se muestra en la gráfico 4.11, estas pilas que acumulan los residuos de 60 días, permitirán un proceso rotativo, ya que cuando este maduro el compost de la pila 1 los residuos del día 61 podrán ser dispuestos en dicho espacio. Se considera el espacio de una pila más para realizar el volteo sin ninguna dificultad como se señala en el gráfico 4.12.

Gráfico 4.11.- Distribución de pilas de compostaje



Gráfico 4.12.- Sistema de volteo de pilas



Relación Carbono Nitrógeno (C/N): la relación C/N de los residuos orgánicos a compostar, de acuerdo a los análisis previamente realizados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.38.- Resultados de análisis realizados

Parámetro	Unidad	Muestras de Residuo Fresco				Promedio
		1-1	2-1	3-1	5-1	
C Orgánico Total	%	18.60	30.50	21.30	17.30	21.93
Nitrógeno	%	0.78	1.27	0.89	0.72	0.91

De los datos de la tabla podemos observar que los residuos orgánicos frescos generados en la unidad minera Cerro Lindo presentan una relación C/N de 24.09, siendo lo adecuado entre 20 y 30<sup>1</sup>, lo que representa una buena relación de nutrientes y la combinación con otros materiales debe ser controlada considerando esta misma relación C/N, realizando un balance de nutrientes, para lo cual se puede considerar los valores mostrados en la tabla 4.39.

Tabla 4.39.- Relación C/N de algunos materiales

Materiales	C%	N%	C/n
Aserrines	40	0.1	400
Podas, tallos, maíz	45	0.3	150
Paja de caña	40	0.5	80
Hojas de arboles	40	1	40
Estiércol de equino	15	0.5	30
Estiércol de ovino	16	0.8	20
Heno	40	2	20
Estiércol de bovino	7	0.5	15
Estiércol de gallina	15	1.5	10

Humedad: El sustrato seleccionado para la generación de compost, registra una humedad promedio de 58.36% tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.40.- Resultados de humedad de residuos frescos

Parámetro	Unidad	Residuo Fresco				PROMEDIO
		1-1	2-1	3-1	5-1	
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 5	
Humedad	%	63.50	45.02	60.05	64.86	58.36

Considerando la humedad inicial tiene un promedio de 58 %, debemos hacer que pierda humedad, mezclándolo con materiales secos (paja, aserrín, otros), esta humedad sebera ser controlada diariamente siendo el rango ideal entre 40 – 60 %.

Humedades superiores a los valores indicados producirían un desplazamiento del aire entre las partículas de la materia orgánica, con lo que el medio se volvería anaerobio, favoreciendo los metabolismos fermentativos y la respiración es anaeróbicas. Si la humedad se sitúa en valores inferiores al 10%, desciende la actividad biológica general y el proceso se vuelve extremadamente lento. En la tabla 4.41 se muestran las consideraciones para el control de humedad.

*Tabla 4.41.- Consideraciones para el control de humedad*

N° de personal	Procedimientos	Instrumento
2 operarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar el instrumento adecuado para la medición de la humedad.</li> <li>- Verificar que se encuentre en un rango de 40 – 60%</li> <li>- Registrar los datos obtenidos, indicando fecha y hora.</li> <li>- De acuerdo al resultado obtenido, se deberá regar para alcanzar el porcentaje de humedad adecuado.</li> </ul>	Medidor de Humedad HH2.

Temperatura: Considerando el periodo de 2 meses, la temperatura varía por semana, en la tabla 4.42 se presenta la variación de temperatura durante el proceso de compostaje y en la tabla 4.43 las consideraciones para el control de temperatura.

*Tabla 4.42.- Variación de la temperatura durante el proceso de compostaje (FAO 2012)*

PERIODO	SEMANA 1 -2 (FASE MESOFILA)	SEMANA 3, 4, 5 (FASE TERMOFILA)	SEMANA 6, 7 (FASE MESOFILA)	SEMANA 8 (MADUREZ)
Referencia de temperatura	15° - 40°	40° - 65°	15° - 40°	10° - 25°

Tabla 4.43.- Consideraciones para el control de la temperatura

Nº de personal	Procedimientos	Instrumento
2 operarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar el instrumento adecuado para la medición de la temperatura, medir la temperatura de la pila en el centro de esta y en 2 puntos equidistantes de la misma.</li> <li>- Verificar que se encuentre en un rango especificado en la tabla anterior.</li> <li>- Registrar los datos, indicando fecha y hora.</li> <li>- De acuerdo al resultado obtenido: Si la temperatura comienza a decrecer, de deberá realizar un volteo y riego, para brindarle las condiciones que permitan continuar los procesos microbianos.</li> </ul>	Medidor de contacto para suelos.

pH: El rango de tolerancia de pH de los microorganismos no es homogéneo, por ejemplo:

- La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6.0-7.5
- La mayor actividad fúngica se produce a pH 5.5-8.0
- Rango ideal 5.8-7.2
- Ph > 7.5 puede promover perdida de amonio gaseoso

Los valores inferiores a 5.5 (ácidos) inhiben el crecimiento de la gran mayoría de los grupos fisiológicos, así también valores superiores a 8 (alcalinos) también son agentes inhibidores del crecimiento, haciendo precipitar nutrientes esenciales del medio, de forma que no son asequibles para los microorganismos (ver tabla 4.44 y 4.45).

Tabla 4.44.- Variación de la temperatura durante el proceso de compostaje  
(FAO 2012)

Periodo	Semana 1 - 2 (Fase Mesófila)	Semana 3, 4, 5 (Fase Termófila)	Semana 6, 7 (Fase Mesófila)	Semana 8 (Madurez)
Referencia de pH	4 – 6	8 – 9	7 – 8	6 – 8

Tabla 4.45.- Consideraciones para el control del pH

Nº de personal	Procedimientos	Instrumento
2 operarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar el instrumento adecuado para la medición del pH</li> <li>- Verificar que se encuentre en un rango especificado en la tabla anterior.</li> <li>- Registrar los datos, indicando fecha y hora.</li> <li>- De acuerdo al resultado obtenido: Proceder adicionando agua y aireando (volteo)</li> </ul>	Medidor de contacto para suelos.

Conductividad: es muy importante controlarla, ya que indica la salinidad del compost, esta no debe ser superior a 2 mS/cm. En la tabla 4.46 se presentan las consideraciones del control de pH.

Tabla 4.46.- Consideraciones para el control de la conductividad

Nº de personal	Procedimientos	Instrumento
2 operarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar el instrumento adecuado para la medición del CE</li> <li>- Verificar que se encuentre en un rango especificado en la tabla anterior.</li> <li>- Registrar los datos, indicando fecha y hora.</li> </ul>	Medidor de contacto para suelos.

Tamizado: después de 60 días de iniciado el proceso el compost debe presentar una coloración oscura, puesto que ya llegó a su etapa de maduración y es recomendable separar aquellos residuos que por sus características no se han podido degradar, es decir debemos pasar el compost maduro a través de un tamiz, de 10mm de diámetro, lo permite dar una granulometría más fina al producto favoreciendo su aplicación y agregándole valor comercial, los restos que no han terminado su proceso de degradación podrán ser nuevamente dispuestos en una pila.

Empaquetado: una vez listo el producto se procederá al empaquetado para su posterior distribución y/o comercialización.

### 4.4.3 Inconvenientes más frecuentes

El compostaje, como hemos podido ver, es un proceso sencillo, pero aun así, podemos encontrarnos con ciertas dificultades. A continuación, se recogen los problemas más comunes, las causas y sus posibles soluciones.

Tabla 4.47.- Problemas más usuales en el compostaje, efecto, causas y soluciones

Efecto observado	Causas posibles	Soluciones
Baja temperatura del material	Hay poco material	Incrementar el volumen de material y/o cubrir
	Poca humedad	Añadir agua mientras volteas
	Poca aireación	Voltear
	Déficit de nitrógeno	Mezclar componentes nitrogenados (estiércol, césped, etc.)
	Bajas temperaturas ambientales	Incrementar el volumen de material y/o cubrir
Olor a podrido	Exceso de humedad (Falta de oxígeno)	Voltear, mezclar material seco estructurante (serrín, poda, ...)
	Compactación	Voltear, mezclar material estructurante
Altas temperaturas	Insuficiente ventilación	Voltear
Capa blanca sobre el material	Hongos	No representa ningún problema, son consecuencia de la actividad microbiana
Plagas		
Moscas	Exceso de humedad	Mezclar bien con material estructurante
	Los restos de fruta atraen insectos.	Las moscas de la fruta contribuyen a la descomposición, si se presentan en exceso, implementar atrapa insectos.
Gusanos blancos y gordos	Normalmente son larvas de mosca que proliferan cuando hay mucha humedad	Mezclar con material seco estructurante
Roedores	Atracción por algún material	Mezclar bien materiales y cubrir
Otros insectos	Condiciones ambientales favorecen la proliferación	No representa ningún problema, también son descomponedores, pero tomar medidas si su proliferación es excesiva

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS ECONÓMICO DEL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA UNIDAD MINERA

El presente capítulo considera el análisis de costo-beneficio de la implementación de un sistema de tratamiento de residuos sólidos orgánicos para la obtención de biogás y compost.

#### 5.1 Análisis de Costo-Beneficio para el biogás

El análisis costo-beneficio se realizó bajo dos propuestas: Propuesta 1 (Producción de energía a través de un motor para la generación eléctrica) y Propuesta 2 (Quema de metano a través de un quemador atmosférico). En ambas propuestas se muestran los equipos a utilizar, los costos de inversión, así como los beneficios ambientales involucrados en la implementación de cada propuesta.

##### 5.1.1 Costos de Inversión Total

Este costo se define según la relación de costos y capacidad de la planta. Según las metodologías aplicadas para la evaluación técnica económica de implementación de sistemas de tratamiento anaeróbico, esta se encuentra en función del costo de inversión fija e inversión de trabajo, definiendo este último como el 15% de la inversión fija.

$$\text{Inversión total (IT)} = \text{Inversión Fija (IF)} + \text{Inversión de trabajo (W)} \dots (5.1)$$

5.1.1.1. Cálculo de la Inversión de la planta (IF): La inversión fija se determina en función a los gastos de inversión directa (ID) e indirecta (II) que por lo general vincula costos de equipos, instalación e infraestructura e imprevistos considerándose este último en un 10% de los costos indirectos.

$$\text{Inversión fija (IF)} = \text{Inversión Directa (ID)} + \text{Inversión Indirecta (II)} \dots (5.2)$$

5.1.1.2. Inversión de trabajo (IW): La inversión de trabajo se encuentra en función a la inversión fija, pudiéndose calcular mediante la siguiente expresión:

$$\text{Inversión de trabajo (IW)} = \frac{\text{Inversión fija (IF)} * 15}{85} \dots (5.3)$$

## 5.1.2 Análisis de la Propuesta 1 – Producción de Energía

5.1.2.1. Equipos: Los equipos presentados en el Capítulo IV, serán utilizados como base del diseño del sistema siendo una variante el motor B4T-10 000 Biofex, el cual utilizará el biogás obtenido para la generación eléctrica. En la tabla 5.1 se presenta las características técnicas del generador.

Tabla 5.1.- Especificaciones técnicas del motor (Bio Soluciones 2013)

Especificaciones técnicas	
Modelo	B4T-1000
Motor	Branco de 4 tiempos
Potencia	9.5 KW
Rotación	3600 rpm
Voltaje	220 Vol.
Trasporte	Compacto y portátil
Otros	Sistema de filtro integrado que permite la conexión directa al digestor
Consumo	5.0 m <sup>3</sup> de biogás por hora trabajo
Biogás	Concentración del 60%

5.1.2.2. Costo de Inversión: En la tabla 5.2, se presentan los costos de inversión total para la implementación de la planta de producción de biogás con aprovechamiento energético.

Tabla 5.2.- Costo de inversión total para la construcción de la planta de producción de biogás (ESCEGIS S.R.L 2013: 53)

PROPUESTA 1: CONSTRUCCION DE PLANTA							
COSTOS DIRECTOS							
Equipos	Cant	Cap	Un	Cap total	CU (S/.)	Costo (S/.)	Proveedor
Biodigestor (incluidos reservorios de biol y entradas)	7	15.7	m <sup>3</sup>	102.8	2,127.50	14,889.50	
Almacén de biogás	1	16	m <sup>3</sup>	16	785.00	785.00	
Asesoría de Implementación	1		Per		4,000.00	4,000.00	CIDELSA O COPLAST
Motor B4T-5 000	1	9	kW		12,000.00	12,000.00	BIO SOLUCIONES
Terma de tubos al vacío	1	200	lt		4,000.00	4,000.00	LIDER SAC
Sub total						S/. 35,677.50	

<b>COSTOS INDIRECTOS</b>		
Obra civiles o imprevisto		S/. 10,000.00
Sub total		S/. 10,000.00
INVERSION FIJA		S/. 45,677.50
INVERSION DE TRABAJO		S/. 8,060.74
INVERSION TOTAL		S/. 53,738.24

### 5.1.2.3. Beneficios Ambientales

#### 5.1.2.3.1. Reducción de Contaminación

El principal beneficio ambiental de esta propuesta es la reducción de emisión de gases de efecto invernadero GEI ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ), con la producción de biogás se dejaron de emitir 7.1 ton/mes de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. Asimismo, convertir residuos orgánicos en biogás incrementa de manera indirecta la protección de suelos y aire.

#### 5.1.2.3.2. Reducción de Energía

La producción energética (biogás) suple necesidades de consumo de energía no renovable como el diésel o la gasolina. Asimismo, se hará un incremento de generación de energía renovable.

#### 5.1.2.3.3. Producción de biofertilizantes

El proceso de biodigestión ofrece sub-productos de abono natural (biosol y biol) los cuales pueden ser usados directamente como mejorador de suelo o como insumo para compostaje.

El producir fertilizantes naturales evita el uso de fertilizantes químicos cuya producción y aplicación excesiva tiene consecuencias negativas para el medio ambiente global y local.

#### 5.1.2.3.4. Mejora del Sistema de Gestión de Residuos

La producción de biogás ayuda a conseguir un sistema de gestión de residuos más sostenible al extraer energía de los mismos, promoviendo la educación ambiental y enseñanzas sobre segregación y aprovechamiento de residuos sólidos.

#### 5.1.2.4. Beneficios Económicos

En la tabla 5.3 se muestra los costos por mantenimiento mensual del plan de producción de biogás. Así mismo los ingresos por los productos y sub productos del proceso, teniendo en cuenta beneficios ambientales como son la reducción de emisión de Gas Efecto Invernadero, las cuales tienen un costo denominado bono de carbono brindados por el Banco Internacional., También disminuye el costo asociado a la disposición de residuos que sería necesario en caso de disponerlos en un relleno sanitario.

Cabe señalar que la energía producida no abastecerá lo requerido por el equipo de pre tratamiento (picadora), pero brindará el 10% de abasto de energía para su funcionamiento.

*Tabla 5.3.- Costo de recuperación de inversión – Propuesta 1  
(ESCEGIS S.R.L 2013: 54)*

<b>PROPUESTA 1 - COSTO DE RECUPERACION</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>		<b>Costo unitario S/.</b>	<b>Costo total S/.</b>
Inversión				
Construcción de planta				53,738.24
Costo de mantenimiento mensual				
Agua	m <sup>3</sup>	44.70	2.40	107.28
Energía	kW/h	288	. 0.13	36.58
Mano de obra	Personas	1	300.00	300.00
Sub total				443.86
Producción de energía y beneficio ambiental				
Energía	kW/h	33.72	0.13	. 4.38
Biol (fertilizante)	m <sup>3</sup>	57.30	2.00	114.60
Biosol (compost)	Ton	0.42	46.00	19.43
Internamiento en relleno	Ton	26.11	25.00	652.75
Bono de carbono	Ton	7.12	12.00	85.44
Subtotal				876.60
Superávit mensual				432.75
Superávit Anual				5,192.95
Tiempo de recuperación (años)				10.3

### 5.1.3 Análisis de la Propuesta 2 – Quema de Metano

#### 5.1.3.1. Equipos

Los equipos presentados en el capítulo IV serán utilizados como base del diseño del sistema siendo una variante el quemador atmosférico, el cual se utilizará para quemar el biogás obtenido, no permitiendo que este sea emitido a la atmósfera. En la tabla 5.4 se presenta las características técnicas del quemador.

Tabla 5.4.- Especificaciones Técnicas del quemador atmosférico

Fuente: ALANPER CICEX S.A.S

Especificaciones técnicas	
Modelo	R15 EQA
Dimensiones	Ø externo 155mm -Ø interno 88mm - Altura 86 mm
Capacidad	12 000 Kcal/hora
Entrada	1"

### 5.1.3.2. Costo de Inversión

En la tabla 5.5 se presentan los costos de inversión total para la implementación de la planta de producción de biogás para quemado de metano.

Tabla 5.5.-: Costo de inversión total para la construcción de la planta de quemado de metano (ESCEGIS S.R.L 2013: 55)

PROPUESTA 2: CONSTRUCCION DE PLANTA							
COSTOS DIRECTOS							
Equipos	Cant	Cap	Un	Cap total	CU S/.	Costo S/.	Proveedor
Biodigestor (incluidos reservorios de biol y poza de entrada)	7	14.6	m <sup>3</sup>	102.8	2,127.50	14,892.50	
Almacén de biogás	1	16	m <sup>3</sup>	16	785.00	785.00	
Asesoría de Implementación	1		Per		4,000.00	4,000.00	CIDELSA O COPLAST
Quemador de biogás EQA	1				1,800.00	1,800.00	ALANPER
Terma de tubos al vacío	1	200	lt		4,000.00	4,000.00	LIDER SAC
Sub total						S/. 25,477.50	
COSTOS INDIRECTOS							
Obra civiles o imprevisto						S/. 10,000.00	
Sub total						S/. 10,000.00	
INVERSION FIJA						S/. 35,477.50	
INVERSION DE TRABAJO						S/. 6,260.74	
INVERSION TOTAL						S/. 41,738.24	

### 5.1.3.3. Beneficios Ambientales

#### 5.1.3.3.1. Reducción de Emisiones

Al igual que la propuesta 1, el principal beneficio ambiental es la reducción de emisión de gases de efecto invernadero GEI (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), dejando de emitir 7.1 ton/mes de

CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Asimismo, un beneficio notable es la reducción de desechos sólidos y su transformación a productos fertilizantes.

#### 5.1.3.3.2. Producción de Biofertilizantes Sub Productos

La aplicación del efluente producido por el biodigestor (abono orgánico o bio abono), aumenta la fertilidad del suelo permitiendo así el aumento de la producción de las plantas.

#### 5.1.3.4. Beneficios Económicos

En la tabla 5.6, se muestra los costos por mantenimiento mensual de plan de producción de biogás, los ingresos por los productos y sub productos del proceso, teniendo en cuenta benéficos ambientales como son la reducción de emisión de Gases de Efecto Invernadero, las cuales tienen un costo denominado bono de carbono, brindado por el Banco Internacional. Asimismo, el costo por disposición de residuos que sería necesario en caso de disponerlos en un relleno.

Cabe señalar que la energía producida no abastecerá lo requerido por el equipo de pre tratamiento (picadora), pero brindará el 10% de abasto de energía para su funcionamiento.

*Tabla 5.6.- Costo de recuperación de inversión – Propuesta 2  
(ESCEGIS S.R.L 2013: 57)*

PROPUESTA 2 - COSTO DE RECUPERACION				
Parámetro	Unidad		Costo unitario s/.	Costo total S/.
Inversión				
Construcción de planta				41,738.24
Costo de mantenimiento mensual				
Agua	litros	44.70	2.40	107.28
Energía (picadora)	kW/h	288	0.13	36.58
Mano de obra	horas	60	5.00	300.00
	10			443.86
Producción de energía y costo ambiental				
Biol (fertilizante)	m <sup>3</sup>	57.30	2.00	114.60
Biosol (compost)	Ton	0.01	46.00	0.65
Internamiento en relleno	Ton	26.11	25.00	652.75
Bono de carbono	Ton	7.12	12.00	85.44
				853.44
Superávit mensual				S/. 409.58
Superávit anual				S/. 4,914.98
Tiempo de recuperación (años)				8.5

## 5.2 Análisis de Costo y beneficio para el compost

### 5.2.1 Costo de Inversión

Para la mejora del sistema de compostaje y control de proceso es recomendable la adquisición de los equipos presentados en la siguiente tabla, en la cual se muestra el costo de esta mejora a realizarse en el proceso actual.

Tabla 5.7.- Costo de equipos para la mejora y control del proceso de compostaje

Equipos	Cant	Cap	CU \$	CU S/.	Proveedor
Medidor de Humedad HH2 con WET sensor	1		3220.34	9,016.95	TECFRESH
Medidor de Ph y T° de contacto para suelos	1		830.51	2,325.43	TECFRESH
Medidor de CE	1		449.15	1,257.62	TECFRESH
PICADORA M: EN 12B + motor + accesorios	1	2500 a 11500 Kg/hor		11,300.00	GRUPO AGRINMAR
Costo total S/.				23,900.00	

### 5.2.2 Beneficios

#### 5.2.2.1 Disminución de inconvenientes más frecuentes

El compostaje, como hemos podido ver, es un proceso sencillo, pero aun así, podemos encontrarnos con ciertas dificultades. A continuación, se recogen los problemas más comunes, las causas y sus posibles soluciones.

Como se observa uno de los principales efectos es debido a la temperatura y a la humedad. Al tener estas dos variables controladas podemos mejorar la calidad del compost.

Tabla 5.8.- Problemas más usuales en el compostaje, efecto, causas y soluciones

Efecto observado	Causas posibles	Soluciones
Baja temperatura del material	Hay poco material	Incrementar el volumen de material y/o cubrir
	Poca humedad	Añadir agua mientras volteas
	Poca aireación	Voltear
	Déficit de nitrógeno	Mezclar componentes nitrogenados (estiércol, césped, etc.)
	Bajas temperaturas ambientales	Incrementar el volumen de material y/o cubrir
Olor a podrido	Exceso de humedad (Falta de oxígeno)	Voltear, mezclar material seco estructurante (serrín, poda, ...)
	Compactación	Voltear, mezclar material estructurante
Altas temperaturas	Insuficiente ventilación	Voltear
Plagas		
Moscas	Exceso de humedad	Mezclar bien con material estructurante
	Los restos de fruta atraen insectos.	Las moscas de la fruta contribuyen a la descomposición, si se presentan en exceso, implementar atrapa insectos.
Gusanos blancos y gordos	Normalmente son larvas de mosca que proliferan cuando hay mucha humedad	Mezclar con material seco estructurante

#### 5.2.2.2 Mejoramiento de la calidad del suelo

Al realizar una mejora en el proceso, la calidad del compost tendrá una mejor influencia en la fertilidad del suelo en el que se aplicará este; es así como se logrará un mejor impacto en la recuperación de suelos poco fértiles y obtener mejores productos finales.

## **CAPITULO VI**

### **PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PLANTA DE BIOGÁS EN OTRAS UNIDADES MINERAS**

Los residuos sólidos orgánicos tienen alto grado de aprovechamiento energético logrando obtener biogás a través de un proceso de digestión anaerobia. En los capítulos IV y V se ha analizado los parámetros para la implementación de una planta de biogás en una determinada unidad minera. El presente capítulo desarrollará los parámetros generales a evaluar en un estudio preliminar o de pre factibilidad de un proyecto de implementación de planta de biogás a través del proceso de digestión anaeróbica en cualquier unidad minera.

Cada proyecto es único y necesita parámetros específicos para la generación de biogás; sin embargo, existen algunos parámetros generales que deben ser analizados y que pueden favorecer o perjudicar el proceso.

#### **6.1. Finalidad de la planta de biogás**

El primer paso para la evaluación de la instalación de una planta de biogás es establecer la finalidad principal que tendrá el proyecto de biogás. Un proyecto de biogás puede generar diversos beneficios a la empresa minera, pero es necesario establecer cuál será el principal propósito del posible proyecto. La generación de biogás puede ser utilizado como un control ambiental que generará impacto ambiental positivo en la unidad minera; también puede ser empleado como un proyecto de responsabilidad social para beneficiar a las comunidades cercanas al complejo minero; o simplemente se puede utilizar para el aprovechamiento energético del biogás.

La finalidad principal establecida para la planta de biogás influirá significativamente en el análisis de costo beneficio del proyecto; es por esto que este paso es uno de los más importante en un análisis de pre-factibilidad de una planta de biogás.

#### **6.2. Características de los Residuos Sólidos Orgánicos**

##### **6.2.1 Cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos Generados**

Los principales parámetros operativos para la producción de biogás son la cantidad y calidad del sustrato (residuos sólidos orgánicos); si estos factores son adecuados entonces se incrementará la producción de biogás y el beneficio económico asociado al recurso energético.

La cantidad de residuos sólidos orgánicos generados en la unidad minera es un parámetro muy importante para el desarrollo de una planta de biogás. Para el caso de las empresas mineras, los comedores y las cocinas representan el principal aporte de residuos sólidos orgánicos; por lo cual, la cantidad de residuos generados dependerá directamente de la cantidad de personal contratado que recibe alimentación en los comedores de la empresa. Asimismo la cantidad generada debe ser regular a lo largo del tiempo con la finalidad de asegurar el abastecimiento adecuado a la planta de biogás. Si el abastecimiento disminuye, las bacterias podrían morir de inanición; asimismo si la cantidad de residuos ingresados es mayor a la capacidad de diseño se reducirá el tiempo de retención disminuyendo la producción de biogás. (UPME 2003: 15)

La cantidad generada de residuos sólidos orgánicos debe ser cuantificada realizando un minucioso inventario según tipo y cantidad por día durante un periodo de tiempo adecuado asegurando que los valores muestreados sean significativos.

La cantidad mínima de residuos orgánicos necesaria para la generación de biogás a través del proceso de digestión anaerobia es muy variable, pues existen diversos tipos de biodigestores que funcionan con diferentes capacidades de abastecimiento del sustrato. Asimismo la cantidad mínima dependerá del objetivo o finalidad principal establecida para la planta de biogás. Una planta doméstica puede operar con un rango promedio de abastecimiento diario entre 10 a 50 kg. Por otro lado, una planta comercial opera generalmente a partir de 200 kg de abastecimiento de alimento por día (Rodríguez 2014: 51-55). Es importante resaltar que los valores mencionados son relativos pues existen otros factores que influyen en la factibilidad de un proyecto de biogás como la calidad o potencial energético de los residuos orgánicos; sin embargo estos valores referenciales pueden ser utilizados en un análisis de pre-factibilidad.

### **6.2.2 Potencial Energético**

El potencial energético indica la calidad de los residuos sólidos orgánicos; este valor representa la energía que se puede aprovechar de los residuos para la obtención de biogás; este parámetro es muy importante pues influye directamente en la cantidad de biogás que se puede generar en la planta. Para determinar el potencial energético es necesario realizar un estudio de factibilidad; pues se requiere obtener diversos parámetros y características de los residuos a través de análisis en laboratorios.

Para el caso de las empresas mineras, los principales residuos orgánicos reciclables son los residuos de alimentos generados en los comedores y cocinas. Los residuos de alimentos tienen alto grado de potencial energético, alrededor de 50 a 65 % de contenido de metano (Al Seadi 2008: 19, tabla 3.2); por lo cual el análisis se puede

obviar en un estudio de pre-factibilidad. A continuación, la tabla 6.1, presenta una lista de algunos sustratos (alimentos frescos) y la cantidad energía que puede generar a través de un proceso de digestión anaerobia. Los valores descritos son referenciales.

*Tabla 6.1.- Potencial Energético según tipo de Sustrato  
(CROPGEN 2005)*

Sustrato	PE m <sup>3</sup> de metano / ton de sustrato
Residuos de Manzana	437
Residuos de Plátano	271
Residuos de Repollo	291
Residuos de Zanahoria	502
Cáscaras de naranja y mandarina.	433
Residuos de papa	205
Residuos de Arroz	365
Papel	92

Como se puede observar en la tabla 6.1, el potencial energético de los alimentos es variable. Se identifica que los residuos de zanahoria presentan un alto potencial energético mientras que el papel (principal contaminante de los residuos de comida) tiene el valor más bajo de la lista.

Asimismo, se resalta que los valores establecidos en la tabla corresponden a residuos frescos de alimentos y son referenciales, pudiendo ser utilizados solo en un estudio de pre-factibilidad. Si el resultado es favorable se deberá realizar un análisis de caracterización de los sustratos en laboratorios.

### **6.2.3 Composición del Sustrato**

Las bacterias empleadas en el proceso de digestión anaeróbica no solo necesitan sustancias orgánicas como fuente de energía; sino requieren ciertos nutrientes minerales. Adicional al carbón e hidrógeno, la generación de biomasa requiere nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, entre otros. Generalmente los residuos orgánicos de agricultura y municipales contienen cantidades adecuada de las sustancias mencionadas. Sin embargo, concentraciones elevadas de algunas sustancias usualmente causan efectos inhibidores; por lo que se debe realizar análisis específicos para determinar la cantidad de nutrientes.

### **6.3. Otros Factores**

#### **6.3.1. Cultura de segregación**

Según lo expuesto en la sección anterior, la producción de biogás depende de la cantidad y calidad del sustrato que ingresa en el proceso de digestión anaeróbica. Para asegurar la calidad adecuada de los residuos orgánicos, la correcta segregación es un factor fundamental pues los residuos deben contener un mínimo porcentaje de contaminación. Los principales contaminantes son papeles, servilletas, plásticos, envolturas, entre otros.

La empresa minera debe contar con un sistema de gestión de residuos sólidos eficiente, el cual debe incluir capacitaciones para la segregación adecuada de residuos sólidos con la finalidad de generar concientización de todo el personal de la unidad minera.

#### **6.3.2. Temperatura**

La velocidad de generación de metano, en el proceso de digestión anaeróbica, incrementa a mayor temperatura. Sin embargo, la cantidad de amoníaco libre también incrementa con la temperatura, lo cual puede reducir o incluso inhibir el desempeño del proceso. Las plantas de biogás que emplean calor natural del ambiente se desempeñan adecuadamente en lugares donde la temperatura promedio anual es alrededor de 20 °C o superior, o cuando la temperatura promedio del día es por lo menos 18 °C. El rango óptimo de temperatura para el proceso es de 20 a 28 °C. Si la temperatura es menor a 15 °C, la producción de metano será demasiado lenta, lo que puede ocasionar que no sea económicamente factible.

La factibilidad para la implementación de un proyecto de biogás a través del proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos depende de muchos factores; sin embargo, se ha seleccionado los parámetros más importantes a analizar en un estudio de pre-factibilidad con la finalidad de que cualquier empresa minera pueda realizar una evaluación inicial y si los parámetros son favorables se pueda ejecutar un estudio de factibilidad con asesoría especializada en el tema.

## **CONCLUSIONES**

1. Se elaboró un estudio de la problemática actual de la gestión de residuos sólidos orgánicos en el Perú y en la unidad minera seleccionada; el cual permitió establecer la base para realizar el análisis de factibilidad para el aprovechamiento de los residuos orgánicos.
2. El proyecto de implementación de una planta de biogás analizado es factible, según los siguientes valores: La propuesta 1 requiere una inversión total de 54,738 soles y genera una rentabilidad anual de 5,192 soles; por lo cual el tiempo de recuperación de la inversión es de 10.3 años. La propuesta 2 requiere una inversión total de 41,738 soles y genera una rentabilidad anual de 4,914; por lo cual el tiempo de recuperación de la inversión es de 8.5 años.
3. El tratamiento de residuos sólidos orgánicos a través del proceso de digestión anaeróbica genera diversos beneficios, los cuales van desde ventajas ambientales por la reducción en la emisión de residuos y gases de efecto invernadero; hasta rentabilidad económica por la obtención de energía renovable como lo es el metano. En la unidad minera seleccionada, la obtención de biogás genera un impacto positivo tanto para la empresa como en la comunidad más cercana, ya que la empresa disminuye sus costos y la población es beneficiaria en el uso del mismo mediante un programa de responsabilidad social. Además, el uso del biogás permite disminuir el consumo de energía eléctrica y genera un impacto positivo con el medio ambiente.
4. Para garantizar la generación de biogás el proceso se debe mantener los parámetros de temperatura de 30-45° C y pH de 6.7-7.5. Se debe tener en cuenta que la calidad y cantidad del biogás producido influirá en los parámetros operacionales del proyecto, si los factores son adecuados se incrementará la producción de biogás y el beneficio económico asociado al recurso energético.
5. Para la propuesta 1 se obtiene una producción de biol (fertilizante) de 57.30 m<sup>3</sup> y 0.42 toneladas de biosol (compost); por otro lado para la propuesta 2 la obtiene una producción de 57.30 m<sup>3</sup> de biol y 0.01 toneladas de biosol.

## BIBLIOGRAFÍA

ABARRAOTALDEA

2016 *Manual práctico de compostaje*. Consulta: 10 de agosto de 2016.

<http://abarrataldea.org/manual.htm>

ACURIO, Guido y otros

1997 *Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y El Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo y Organización Panamericana. Washington D.C.

AL SEADI, Teodorita y otros

2008 *Biogás handbbok*. Univeristy of Southern Denmark Esbjerg. Dinamarca

CROPGEN

2005 *Crop biochemical methane potentials* [programa informático]. EU 6th action framework Project CROPGEN: Renewable energy from crops and agroresidues.

BARTLOMIEJ, Iglinski, Roman BUCZKOWSKI y Marcin CICHOSZ

2015 *“Biogás production in Poland – Current state, potential and perspectives”*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Nicolaus Copernicus University in Torún, Polonia.

BRAVO, Kristina

2014 *“8 brilliant ways Sweden recycles its garbage. Only 1 percent of the Scandinavian country’s trash ends up in landfills”*. Takepart. s/l, 05 de setiembre de 2014. Consulta: 13 de mayo de 2016.  
<http://www.takepart.com/photos/sweden-recycling/>

COMUNIDAD DE MADRID

s/f *Estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid 2006-2016*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. España. Consulta: 14 de mayo de 2016.

<http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3DESTRATEGIA+DE+RESIDUOS+CM+2006-2016.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1196173052051&ssbinary=true>

CONGRESO DE LA REPÚBLICA

2000 *Ley N° 27314*. Ley general de residuos sólidos. Lima, 10 de julio del 2000.

CONAE

2006 Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Consulta: 30 de abril de 2014.

<http://unit-converter.org/es/energia/kW%25C2%25B7h.html>

DEUBLEIN, Dieter y Angelika STEINHAUSER

2008 *Biogás from waste and renewable resources: An introduction*. WILEY-VCH Verlag GmbH % Co. KGaA. Singapore.

DIGESA: Dirección General de Salud Ambiental

2006 *Manual de difusión técnica N° 01. Gestión de los residuos peligrosos en el Perú*. Lima

ENERGYEDIA

2015 *Planning guide for biogás plants*. Consulta: 26 de agosto de 2016.

[https://energypedia.info/wiki/Planning\\_Guide\\_for\\_Biogás\\_Plants#Physical\\_Conditions](https://energypedia.info/wiki/Planning_Guide_for_Biogás_Plants#Physical_Conditions)

ESCEGIS

2013 Factibilidad para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos de la una Unidad Minera Subterránea.

ESGUERRA, Miguel

1989 *Experiencias prácticas con biodigestores de bajo costo para la generación de energía y el tratamiento de aguas residuales en países de desarrollo*. Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Seminario FAO-CNRE: Tecnologías de producción de biogás. España.

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación

1980 *El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina*. Boletín de Suelos de la FAO. Roma. Consulta: 14 de mayo de 2016.

<http://www.fao.org/3/a-ar127s.pdf>

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

2011 *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. Study conducted for the International Congress “Save Food” at Interpack 2011 Düsseldorf, Germany.

#### FINSTERWALDER UNWELTTECHNIK

s/f *Biogás Technology*. Pioneering technologies for the environment.  
Consulta: 28 mayo de 2016.  
[http://www.fitec.com/index.php?cd\\_categoriaGeral=1](http://www.fitec.com/index.php?cd_categoriaGeral=1)

#### FULFORD, David

1998 *Running a biogás programme: A handbook*. Intermediate Technology. Londres.

#### FUNDACIÓN DE ENERGÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID

2010 *Guía de valorización energética de residuos*. Madrid.

#### GUEVARA V., A.

1996 *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Producción de gas y saneamiento de efluentes. Documento OPS/CEPIS/96. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – Organización Panamericana de la Salud. Lima.

#### GLOSSARY

s/f Tiempo de residencia. Consulta 07 de setiembre de 2016  
[http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/r/residence\\_time.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/r/residence_time.aspx)

#### INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática

2014 *Perú: Anuario de estadísticas ambientales 2013*. Lima.

#### INFOAGRO

2016 *Sistemas de compostaje*. Artículo web. s/l, 03 de agosto de 2016. Consulta: 10 de agosto de 2016.  
<http://infoagro.com/mexico/sistemas-de-compostaje/>

#### JARAMILLO, Gladys y Liliana ZAPATA

2008 *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Monografía de especialización en Gestión Ambiental.* Universidad de Antioquía, Facultad de Ingeniería, Posgrados de Ambiental. Consulta: 29 de abril de 2016.

<http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Apressolorgco.pdf>

LOPEZ G.

s/f *Digestión Anaerobia De Residuos Sólidos Orgánicos, estimación del tiempo de retención dependiendo de los sólidos volátiles totales y de la presencia o no de un inoculo.* Consulta: 20 de junio 2016, Pág. 11.

[http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/226/mi\\_1197.pdf?sequence=1](http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/226/mi_1197.pdf?sequence=1)

LUMBRERAS, Julio y Luz FERNÁNDEZ

2014 *Gestión integral de los residuos sólidos. El modelo de ciudad saludable en Perú.* Centro de Innovación en Tecnología para el Desarrollo Humano. s/l.

MARTI, JAIME

2011 *Biodigestores de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos.* Consulta 01 de setiembre de 2016.

MATUTE, María

2014 *Clasificación de los residuos orgánicos sólidos.* [Diapositiva] Consulta: 21 de abril de 2016.

<https://prezi.com/yjdbj9hdvngh/clasificacion-de-los-residuos-organicos-solidos/>

MIRANDA G, POIRRIER, P, CHAMY, R.

2001 *Evaluación técnico económica de la implementación de un sistema de tratamiento anaerobio con generación energética de la fracción orgánica de los residuos sólidos, XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria. AIDIS.* Chile.

MMAyA / VAPSB / DGGIRS

2012 *Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, mediante compostaje y lombricultura.* Bolivia. Consulta: 18 de mayo de 2016.

<http://www.mmaya.gob.bo/redcompostaje/files/biblioteca/04%20GUIAS%20MANUALES/201%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20S%C3%B3lidos%20Org%C3%A1nicos.pdf>

MONARCA, D.

2014 *Evaluación tecnológica de producción de biogás*. Universidad de Tuscia.

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CALCA

2013 *Estudio de caracterización de residuos sólidos del distrito de Calca*. Cusco

NORTHSTAR RECYCLING

2015 *Industrial organic waste recycling: An introduction*. Food Waste, Organics, Service, Trash talk and Waste Facts. Consulta: 26 de agosto de 2016.  
<http://www.northstarrecycling.com/industrial-organic-waste-recycling-an-introduction/>

OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

2014a *Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial. Informe 2013– 2014. Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional*. s/l

2014b *La fiscalización ambiental en residuos sólidos*. s/l

PALA H.

2006 *Estudio del potencial energético a partir de los residuos sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana. Trabajo de titulación (título de Ingeniero Mecánico de fluido)*. Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

PAVLOSTATHIS, Spyros y Eugenio GIRALDO-GOMEZ

1991 *Kinetics of anaerobic treatment: A critical review*. Critical Reviews in Environmental Control. Volumen 21.

PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS

2004 *Decreto Supremo N° 057-2004-PCM*. Reglamento de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos. Lima, 22 de julio de 2004.

PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú  
2015 Guía PUCP para el registro y el citado de fuentes. Dirección de Asuntos Académicos. Lima.

ROBEN E.

2002 *Manual de Compostaje para Municipios*. Ecuador.

RODRÍGUEZ, Luis

2014 *Variabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos – FORSU*. Documento elaborado para optar por el título de Especialista en Gestión de Residuos Sólidos. Universidad EAN, Facultad de Postgrados, Especialización en Gestión de Residuos Sólidos. Bogotá. Consulta: 25 de agosto de 2016.  
<http://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/1560/RodriguezLuis2014.pdf?sequence=1>

ROMAN P

2012 *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Técnicas de Compostaje*.

ROMÁN, Pilar, María MARTÍNEZ y Alberto PANTOJA

2013 *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura. Oficina Regional para América Latina y El Caribe. Chile.

SILVA, Javier

2014 “¿Cómo saca Holanda partido de la basura?”. *El Tiempo*. Colombia, 14 de julio de 2014. Consulta: 13 de mayo de 2016.  
<http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/aprovechamiento-de-residuos-solidos-en-holanda/14238156>

SVERIGE

2015 *The swedish recycling revolution*. Consulta: 25 de abril de 2016.  
<https://sweden.se/nature/the-swedish-recycling-revolution/>

SZTERN, Daniel y Miguel PRAVIA

1999 *Manual para la elaboración de compost: Bases conceptuales y procedimientos*. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Pág.69. Consulta: 07/08/2016

[http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/que\\_es\\_un\\_biodigestor.html](http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/que_es_un_biodigestor.html)  
<http://www.agriculturesnetwork.org/magazines/latin-america/energia-en-la-finca/los-biodigestores-en-los-sistemas-agricolas>

2001 *Evaluación técnico económica de la implementación de un sistema de tratamiento anaerobio con generación energética de la fracción orgánica de los residuos sólidos, XIV Congreso de Ingeniería Sanitaria. AIDIS. Chile.*

UPME: Unidad de Planeación Minero Energética

2003 *Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión: Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás*. Bogotá, 20 de marzo de 2003.

VARNERO, Maria

2011 *Manual de Biogás*. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Global Environment Facility. Chile.