

**Universidad Tecnológica Nacional**  
Facultad Regional Tucumán  
Escuela de Posgrado

**Aprovechamiento energético de los  
residuos sólidos urbanos para la  
generación de energía eléctrica en la  
Planta de Tratamiento de Overo Pozo,  
Tucumán (Argentina)**

**SANDRA MARIA MARTINEZ**

---

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico Superior de  
Especialista en Ingeniería Bioenergética

Tutor: Mag. EUGENIO QUAIA

San Miguel de Tucumán

Año 2017

# Índice

1. RESUMEN .....	4
2. OBJETIVOS .....	4
3. MARCO DE REFERENCIA.....	5
3.1 Referencias geográficas .....	5
4. PROYECTO NACIONAL GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (PNGIRSU) EN EL GRAN SAN MIGUEL DE TUCUMAN .....	7
4.1 Consorcio Público Metropolitano (CPM)- Antecedentes Institucionales.....	7
4.2 Instalaciones relacionadas al tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU): Planta de Transferencia y Planta de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbano. ....	7
4.2.1 Planta de Transferencia.....	8
4.2.2 Planta de Disposición Final (PDF) en Overo Pozo .....	8
4.3 Caracterización del entorno de PDF .....	9
5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU.....	11
5.1 Objetivos de la caracterización.....	11
5.2 Metodología .....	11
5.3 Separación y pesaje por categoría de la basura en espacio cubierto.....	11
6. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RSU EN DISTINTAS PROVINCIAS Y ESTIMACION PARA OVERO POZO.....	13
6.1 Biogás producido y procesos para la obtención de energía.....	14
6.1.1 Biogás proveniente de los RSU-generalidades .....	14
6.1.2 Biometanización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.....	16
6.1.3 Factores que influyen en la producción de biogás .....	17
7. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS .....	18
7.1 Descripción de sistema integral de captación, conducción y tratamiento del biogás.....	20
7.2 Usos del biogás .....	23
7.2.1 Tratamientos para limpieza de los gases según el uso del biogás.....	25
7.3. Sistemas de generación de electricidad. Motores de combustión.....	27
7.3.1 Sistemas de generación de electricidad. Turbinas de gas.....	28
7.3.2 Sistemas de generación de electricidad. Micro turbinas .....	29
8. ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR EL METANO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DE LOS RSU DISPUESTOS EN UN VERTEDERO .....	29

8.1 Modelo matemático para el cálculo del biogás producido en un vertedero sanitario.....	29
Resulta apropiado para el cálculo de emisiones en sitios de descomposición en forma individual y para la predicción de la generación durante la vida útil del relleno utilizando datos de entrada específica el estudio realizado en “Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica” (Panesso, A.F.; Cadena, J.A.; Mora Flores, J.J.; Ordoñez, M.C. 2011).....	30
8.2 Tasa de producción de biogás .....	30
8.3 Determinación de la energía producida por el biogás.....	31
8.4 Caso Overo Pozo .....	33
CONCLUSIONES .....	34
BIBLIOGRAFÍA.....	35

## **1. RESUMEN**

El estudio se centra en la posibilidad de generar energía eléctrica aprovechando los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) dispuestos en el vertedero ubicado en la localidad de Overo Pozo - Tucumán.

El tratamiento de los RSU constituye, en la actualidad, uno de los más graves problemas de la Salud Pública y del Saneamiento Ambiental.

Los vertederos emiten diversos contaminantes a la atmósfera, fundamentalmente metano y dióxido de carbono. Las características físicas del sitio de implantación del vertedero (clima, lluvias, vientos) y la operatividad y funcionamiento, influyen en la composición de las emisiones.

Se estudió modelos de captación de biogás existentes en vertederos controlados, la composición del biogás promedio producido en los vertederos y la cantidad de metano que podría obtenerse con la finalidad de estimar la energía eléctrica que se pueda generar con el biogás.

Se realizó la estimación de metano producido en el vertedero Overo Pozo considerando las características físicas del entorno y la cantidad de residuo vertido anualmente. Se calculó la energía eléctrica que se puede generar con el biogás captado y se comparó con el consumo actual de la planta.

## **2. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

El propósito de este trabajo fue determinar el caudal de biogás generado en la planta de disposición final de Overo Pozo - Tucumán para estimar la capacidad de conversión en energía eléctrica.

### **Objetivos específicos:**

- Realizar un diagnóstico preliminar de la gestión de residuos sólidos urbanos realizadas por el Consorcio Publico Metropolitano en el área del Gran San Miguel de Tucumán.
- Conocer la cantidad y calidad de biogás producido en el vertedero.
- Estimar las emisiones de metano del vertedero.
- Evaluar tecnologías aplicables a la captación y aprovechamiento energético de los gases proveniente de los RSU.
- Desarrollar un estudio prospectivo de la producción de biogás del vertedero y estimar la capacidad de generación de energía eléctrica.
- Conocer tecnologías apropiadas para el mejor aprovechamiento de biogás generado en el vertedero.
- Establecer criterios que permitan el mejor aprovechamiento energético del biogás en el vertedero

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1 Referencias geográficas

La provincia de Tucumán está situada en la región geográfica del Noroeste Argentino. Limita con las provincias de Salta (Norte), Santiago del Estero (Este y Sur), y Catamarca (Oeste y Sur), (Figura N° 1).

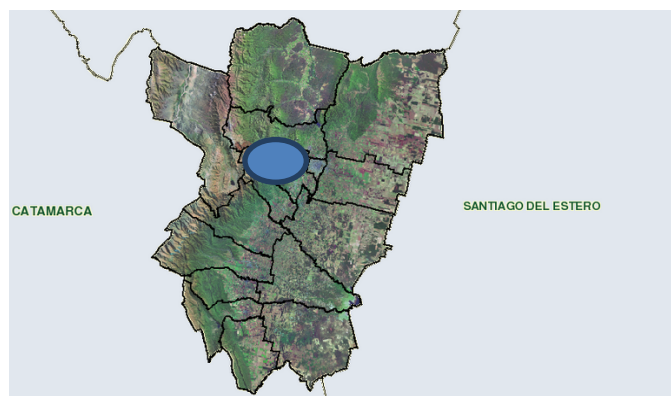


Figura N° 1 – Provincia de Tucumán - Gran San Miguel de Tucumán.

La capital de la provincia es la ciudad de San Miguel de Tucumán y la misma conforma, con municipios y comunas aledañas, un gran conglomerado urbano conocido como el Gran San Miguel de Tucumán.

Las localidades, comunas y Municipios que lo conforman son (Figura N° 2):

- Yerba Buena (Departamento Yerba Buena),
- Alderetes y Banda del Río Salí (Departamento Cruz Alta),
- Diagonal Norte - Luz y Fuerza - Villa Nueva Italita - Los Pocitos, Las Talitas y Tafí Viejo (Departamento Tafí Viejo),
- El Manantial, Barrio Araujo, San Felipe y Santa Bárbara (Departamento Lules).

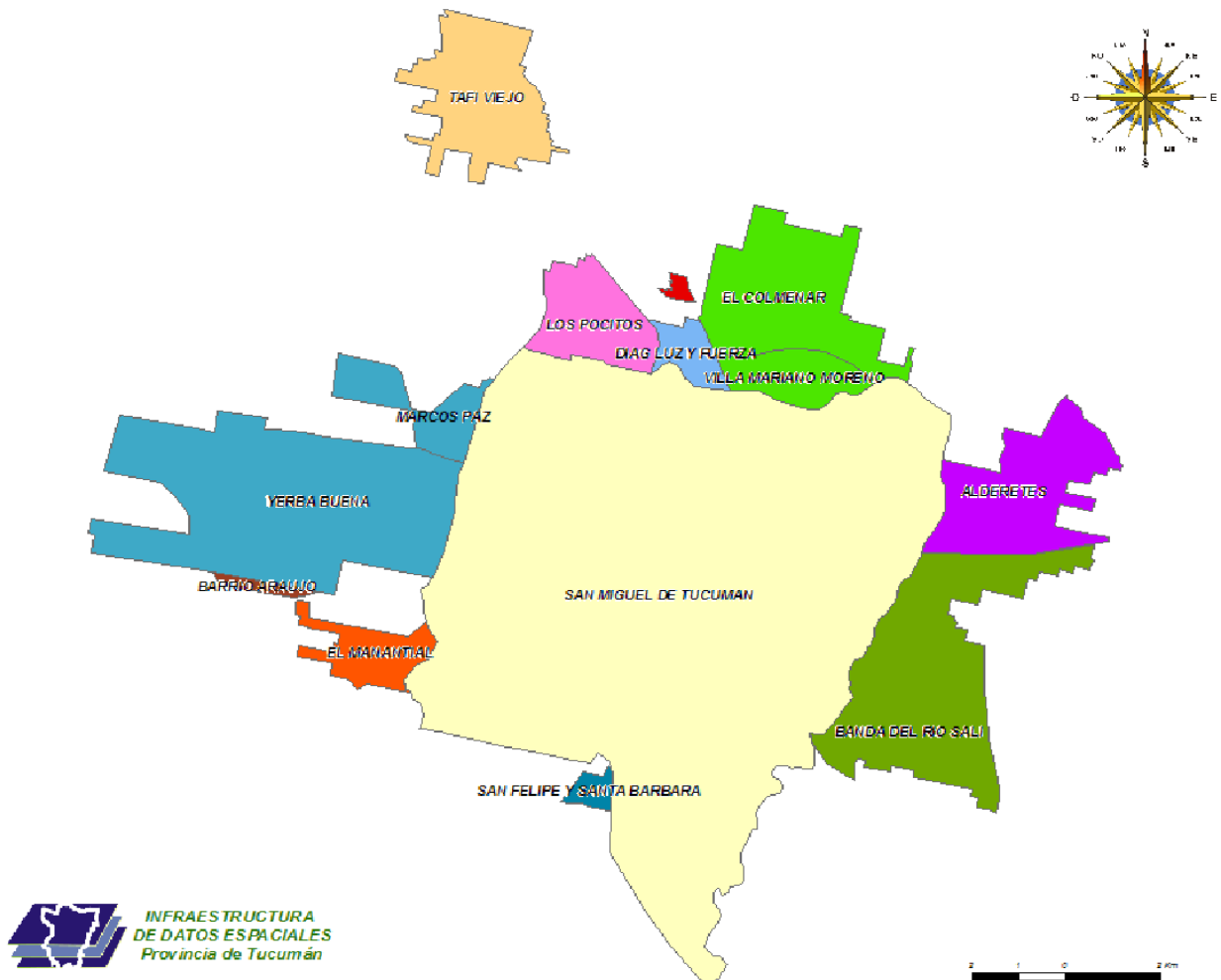


Figura N° 2– Área del Gran San Miguel de Tucumán.

## **4. PROYECTO NACIONAL GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (PNGIRSU) EN EL GRAN SAN MIGUEL DE TUCUMAN**

### **4.1 Consorcio Público Metropolitano (CPM)- Antecedentes Institucionales**

En relación a las acciones vinculadas específicamente con los Residuos Sólidos Urbanos, la Secretaría de Ambiente de la Nación puso en marcha hace unos años el “Proyecto Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos” (PNGIRSU) en el cual se reconoce que “si bien los municipios son los responsables directos del manejo de los residuos, la magnitud de la problemática requiere de la participación de los distintos niveles de gobierno, ya que su inadecuada gestión compromete las condiciones necesarias para asegurar la salud pública y la protección ambiental”. Frente a este escenario la Nación a través de la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS) diseñó la Estrategia Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU) que incluye llevar adelante programas y proyectos nacionales relacionados con los residuos sólidos urbanos (PNGIRSU).

El 24 de agosto de 2009 se acordó abordar en forma conjunta el desarrollo de un Sistema de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos integrado por los Municipios de Alderetes, Banda del Río Salí, Las Talitas, San Miguel de Tucumán, Tafí Viejo y Yerba Buena; que comprende las actividades interdependientes y complementarias entre sí referidas al manejo de residuos sólidos urbanos. Con este fin se constituye el Consorcio Público Metropolitano para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (CPM).

Además de los seis municipios antes mencionados el servicio se extiende a Municipalidades de Lules y Bella Vista, además de las Comunas Rurales y localidades: Cebil Redondo, El Manantial, Raco, San Javier, San Pablo y San Andrés.

### **4.2 Instalaciones relacionadas al tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU): Planta de Transferencia y Planta de Disposición Final de Residuos Sólidos**

**Urbano.**

#### **4.2.1 Planta de Transferencia**

La planta de transferencia se ubica en la localidad de San Felipe, los camiones recolectores llegan a la planta desde las distintas localidades servidas por el consorcio. Los residuos, sin separación o clasificación se colocan en camiones compactos y se trasladan a Overo Pozo para su disposición final.

#### **4.2.2 Planta de Disposición Final (PDF) en Overo Pozo**

La planta de Disposición final de RSU se ubica en la localidad a 5 Km al Norte de Overo Pozo, y a 2 Km al Este del cruce de las rutas provinciales N°303 y 327. Se encuentra aproximadamente a 33,5 Km en línea recta desde el centro de la ciudad de San Miguel de Tucumán (Plaza Independencia), y por red caminera el recorrido asciende a aproximadamente 45 km.

El sitio de disposición final tiene una superficie total de 99 hectáreas, de las cuales sólo 33 hectáreas se utilizan en la actualidad.

En el predio se han construido nuevos módulos para el tratamiento y disposición final de los residuos. Los módulos tienen 250 m de largo por 100 m de ancho y una profundidad de 5 m por debajo del nivel del suelo, con una base de 50 m de ancho por 200 m de largo, Están separados internamente por bermas operativas de 2 metros de altura, lo que permite una óptima operación en celdas contiguas.

Para minimizar el ingreso de agua de lluvia que en contacto con los residuos produce líquidos contaminantes denominados lixiviados, se opera el relleno sanitario compactando los residuos a una densidad de 0,5 a 0,8 ton/m<sup>3</sup>, y luego se dispone lo más rápido posible de una capa de cobertura con tierra. Los módulos están cubiertos con una membrana impermeabilizante sintética de polietileno alta densidad. Si bien la legislación actual exige un grosor de 1500 micrones, el consorcio ha optado por impermeabilizar con una membrana de 2000 micrones. La aplicación de las membranas termina con anclajes de un metro de profundidad en todos sus extremos y sobre ellas se recubrió con 50 cm de suelo, para no permitir que los residuos lleguen a dañar la



membrana, que acepta hasta un estiramiento de un 700% para su rotura.

Los líquidos que llegan al fondo del módulo (lixiviados) cuentan con un sistema de drenaje que fue diseñado con tres líneas de caños, de 110 milímetros perforados cada 20 cm, colocados en forma horizontal y recubiertos por piedra bola, para que puedan ser colectados en la parte más baja de la celda. Este sistema se complementa con caños colocados en forma vertical para que los líquidos que ingresen puedan ser succionados por una bomba. En la actualidad para evitar acumulación de los lixiviados se aprovecha el fenómeno ambiental de evaporación, para lo cual se los disponen en dos piletones impermeabilizados. No obstante, progresivamente se tienen que incorporar nuevas piletas de acopio dado que, con el paso del tiempo, al crecer la superficie del relleno y por ende la mayor cantidad de RSU dispuestos, también va a aumentar la generación diaria de lixiviados. En este momento se encuentra en estudio la instalación de una planta de tratamiento de lixiviados.

Los gases provenientes de los rellenos son captados a través de cañerías de PVC perforadas insertas en el relleno, pero los mismos se ventean a cielo abierto.

#### **4.3 Caracterización del entorno de PDF**

Las características climáticas (lluvias, temperaturas, humedad) afectan la degradación de la materia orgánica; otras como la topografía, el nivel freático, los vientos, la sismicidad y tipo de suelo condicionan: diseño, operatividad y funcionamiento en la planta de disposición final (compactación, cobertura diaria, control de lixiviados, cobertura final). Para la estimación de los valores promedio de lluvias, temperatura y humedad se consideraron los datos provistos por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC)

Para el vertedero de Overo Pozo

- **Topografía.** Se trata de un terreno plano, localizado en una zona rural. La pendiente general del predio es noroeste-sudeste. En el extremo Sur de la propiedad existe un camino vecinal, por el cual, recorriendo unos 5 Km hacia el Este, cruza otro canal, de dirección Norte-Sur, cuyo camino de servicio sale a la Ruta Provincial N° 303.
- **Aguas superficiales.** En la zona no existen ríos, arroyos u otros cuerpos de agua. Si existe una canal de desagüe que bordea el predio por los lados Norte y Oeste, lo que impide el ingreso de caudales de las fincas vecinas. El predio cuenta con constancia de prefectibilidad de no inundabilidad. Dentro del predio existen alcantarillas para favorecer la circulación del agua en los sectores de cruce de caminos con un canal que conduce las aguas hacia una laguna de retención, a fin de evitar escorrentías a terrenos vecinos.
- **Aguas subterráneas.** Existe un pozo perforado en el predio para la provisión de agua a la planta y es utilizado para limpieza de las oficinas, riego de caminerías para evitar polvo en el ambiente, riego para las especies forestales plantadas como barrera, etc. La misma no es utilizada para consumo del personal. Del ensayo de bombeo se determinó que el pozo tiene un nivel estático es de 23 m y el nivel dinámico de 58 m.
- **Sismicidad.** La zona Este de la Provincia de Tucumán es la más desfavorable del punto de vista de los sismos. Esto está estipulado en las normas CIRSOC 103.
- **Suelo.** el nivel freático no se localiza hasta los 8,00 m estudiados y los datos existentes lo ubican a los 18,00 m. Se tiene limos orgánicos en los primeros 0,50 m de profundidad. Entre los 3,00 m - 3,20 m se tiene existencia de limos rojizos y entre los 6,00 m-6,50 m de profundidad limos arcillosos de mayor cohesión, se estima que los suelos impermeables se encuentran a 4,00 m de profundidad con respecto al terreno natural.
- **Vientos.** La dirección predominante de los vientos es el cuadrante Norte y en menor medida Este y Sudoeste. La velocidad media mensual es de 7,5 Km/h y

la anual 11 Km/h, alcanzando valores máximos registrados de 144 Km/h.

- **Características climatográficas.** El Índice de Dantín Revenga se encuentra entre 0 y 2, lo que nos indicaría que la zona donde está ubicada la PDF es húmeda (Tabla N° 1).

**Tabla N° 1- Cálculo del Índice de Dantín-Revenga. Estación EMC. Período 1989-2013**

Temperatura media anual (°C)	19,55
Precipitación media anual (mm)	1.293,65
<b>Índice de Dantín-Revenga (IDR)</b>	<b>1,51</b>

## **5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU**

### **5.1 Objetivos de la caracterización**

Mensurar en cantidad y calidad los componentes de los RSU de las ciudades cuyos servicios de recolección de residuos disponen transitoriamente en la planta de San Felipe y son dispuestos de manera definitiva en la PDF de Overo Pozo.

### **5.2 Metodología**

Para la caracterización de los residuos se trabajó con dos auxiliares de la misma planta. Para realizar el muestreo, se seleccionó al azar un vehículo recolector de residuos, y se procesó una muestra representativa de 200 Kg para separar, clasificar y pesar las distintas fracciones obtenidas. Se confeccionó una planilla donde se registró el porcentaje de las distintas fracciones de la muestra. (Tabla N° 2)

### **5.3 Separación y pesaje por categoría de la basura en espacio cubierto**

De la caracterización se desprende que la variación de porcentaje de residuo orgánico varía entre el 52 y 61 % según la localidad (Tabla N° 2).

**Tabla N° 2 Muestreo de RSU. planilla de caracterización**

Composición de RSU de muestras provenientes de barrios de:					
Fracción		Las Talitas	Banda del Río Salí	Tafí Viejo	Alderetes
1	Orgánicos	53,44%	51,79%	56,62%	60,98%
2	Papel	6,84%	8,66%	4,92%	2,61%
3	Cartón	3,75%	5,58%	4,12%	3,59%
4	TetraPak	1,07%	1,13%	1,30%	0,98%
5	Plásticos Varios	1,82%	2,46%	2,48%	1,96%
6	Bolsas plásticas	13,00%	9,07%	10,55%	9,42%
7	Plásticos PET	2,55%	1,64%	1,93%	1,91%
8	Pañales Descartables	6,30%	9,12%	10,05%	11,05%
9	Tropos	5,63%	2,51%	2,14%	2,61%
10	Telgopor y goma espuma	0,36%	0,15%	0,21%	0,37%
11	Vidrios	2,06%	3,94%	2,48%	1,77%
12	Hojalata y ferrosos	1,43%	1,43%	1,51%	0,93%
13	Aluminio	0,49%	0,51%	0,50%	0,28%
14	Calzado y goma	1,21%	1,79%	0,80%	0,75%
15	Patológicos y Peligrosos	0,04%	0,20%	0,38%	0,79%

A continuación, se detalla un resumen de los datos relevantes para el cálculo de biogás producido en la planta de tratamiento. de Overo Pozo.

- Para la estimación de la población futura se debería considerar al menos 3 escenarios de crecimiento poblacional, con tasas de crecimiento medio anual del 1 o 2% y el promedio (período 1991-2010), para la provincia de Tucumán.
- Población 1.000.000 de habitantes
- Cantidad de RSU 0,60 Kg/hab. día, a 0,90 Kg/hab. día y 45% de orgánicos
- Desde año 2015 hasta año 2040
- Lluvias: 1.293,65 mm anuales
- Temperatura promedio: 19, 5°C

## **6. PRODUCCIÓN DE BIOGAS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RSU EN DISTINTAS PROVINCIAS Y ESTIMACION PARA OVERO POZO.**

Las cantidades de residuos normalmente se estiman basándose en datos recolectados, utilizando datos previos, o una combinación de ambos.

En la Tabla N° 3 podemos observar la generación diaria y anual total por provincias en base a la población proyectada por el INDEC a partir de los datos del CENSO 2001 para los años 2005, 2010 y 2015. Para la realización de esta tabla se usó como base los datos de generación per cápita (GPC) relevados en el 2005 en el marco de la ENGIRSU. Si bien la GPC es un valor que varía en función de factores económicos se puede considerar para este tipo de análisis un número fijo promedio para proyectar la generación futura. Por otro lado, se debe tener en cuenta que la GPC incluye también los residuos generados por el servicio de barrido y limpieza de calles y sumideros.

por La GPC promedio de residuo en todo el país de 0,85 kg/hab/día. En la actualidad, en Argentina se genera un total de 36.036,39 toneladas de residuos sólidos urbanos por día.

Se consideró que la tasa media de generación de residuos con destino final al relleno sanitario de Overo Pozo es creciente. A efectos del cálculo, con un crecimiento lineal desde 0,60 kg/hab.día en 2015 hasta 0,80 kg/hab.día en 2040 (datos obtenidos de relevamientos realizados por el Consorcio Publico Metropolitano).

https://www.google.com... x TC071962.pdf x IGC 1 x https://www.google.com... x

g.ar/megaciudad/N3/Residuos%20Solidos%20Urbanos%20CAMARCO.pdf

PROVINCIA	GPC KG/HAB/DIA	2005			2010			2015		
		POBLACION HAB	GEN DIA TN/DIA	GEN AÑO TN/AÑO	POBLACION HAB	GEN DIA TN/DIA	GEN AÑO TN/AÑO	POBLACION HAB	GEN DIA TN/DIA	GEN AÑO TN/AÑO
Total del país	0,85	38.592.150	34.394,92	12.554.146,54	40.518.951	36.036,39	13.153.282,19	42.403.087	37.631,06	13.735.337,97
Ciudad de Buenos Aires	1,23	3.018.102	3.712,27	1.354.976,89	3.058.309	3.761,72	1.373.027,83	3.090.922	3.801,83	1.387.669,43
Buenos Aires	0,83	14.654.379	12.163,13	4.439.544,12	15.315.842	12.712,15	4.639.934,33	15.940.645	13.230,74	4.829.218,40
Catamarca	0,69	365.323	252,07	92.006,60	404.240	278,93	101.807,84	444.824	306,93	112.028,92
Córdoba	1,05	3.254.279	3.416,99	1.247.202,43	3.396.685	3.566,52	1.301.779,53	3.531.817	3.708,41	1.353.568,87
Corrientes	0,87	980.813	853,31	311.457,17	1.035.712	901,07	328.890,35	1.091.889	949,94	346.729,35
Chaco	0,61	1.024.934	625,21	228.201,56	1.071.141	653,40	238.489,54	1.119.667	683,00	249.293,86
Chubut	0,95	445.458	423,19	154.462,56	470.733	447,20	163.226,67	494.904	470,16	171.607,96
Entre Ríos	0,6	1.217.212	730,33	266.569,43	1.282.014	769,21	280.761,07	1.345.355	807,21	294.632,75
Formosa	0,65	517.506	336,38	122.778,30	555.694	361,20	131.838,40	597.418	388,32	141.737,42
Jujuy	0,71	652.577	463,33	169.115,33	698.474	495,92	181.009,54	744.560	528,64	192.952,72
La Pampa	0,98	321.653	315,22	115.055,28	341.456	334,63	122.138,81	360.694	353,48	129.020,24
La Rioja	0,77	320.602	246,86	90.105,19	355.350	273,62	99.871,12	391.614	301,54	110.063,11
Mendoza	1,15	1.675.309	1.926,61	703.210,95	1.765.685	2.030,54	741.146,28	1.852.017	2.129,82	777.384,14
Misiones	0,44	1.029.645	453,04	165.360,99	1.111.443	489,03	178.497,75	1.197.823	527,04	192.370,37

uos Solidos Urba... x +

ig.org.ar/megaciudad/N3/Residuos Solidos Urbanos CAMARCO.pdf

Primeros pasos Documento sin título

17 de 63

Acercar



**Tabla N<sup>a</sup> 3 Generación diaria y anual total por provincias en base a la población proyectada el INDEC. (González, 2010)**

## 6.1 Biogás producido y procesos para la obtención de energía

### 6.1.1 Biogás proveniente de los RSU-generalidades

El Biogás de vertedero es un combustible constituido por un conjunto de gases formados como subproductos de la descomposición de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en condiciones anaeróbicas (fermentación en ausencia de oxígeno).

El biogás es una mezcla de gases, compuesta principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), constituyendo normalmente más del 97% del mismo. Sus

componentes se indican en la Tabla N° 3.

**Tabla N° 3 – Composición del biogás**

Componente		Porcentaje (Base en volumen seco)
Metano	CH <sub>4</sub>	50-70
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	35-55
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	2-5
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,1-1
Sulfuro	H <sub>2</sub> S	0-1,0
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	0,1-1
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	0-0,2
Monóxido de carbono	CO	0-0,2

Ambos gases (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) son incoloros e inodoros, por lo que son otros gases, como el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y el amoníaco (NH<sub>3</sub>) los que le otorgan el olor característico al biogás y permiten su detección por medio del olfato.

El CH<sub>4</sub>, base energética del biogás, se produce en los vertederos controlados en concentraciones dentro del rango de combustión, lo que confiere al biogás ciertas características de peligrosidad y, por ésta razón, la necesidad de mantener un control sobre él. Por su elevado contenido energético es un combustible eficaz.

El CO<sub>2</sub> es el segundo componente de importancia, es un componente no energético.

El N<sub>2</sub> se debe a filtraciones de aire exterior en la fermentación o a arrastres por el influente. Los niveles del O<sub>2</sub> se producen por filtraciones de aire y su presencia resulta tóxica para las bacterias metanógenas. Además, su exceso en el biogás acarrea potenciales peligros de explosividad para concentraciones altas comprendidas entre 8 y 20% del volumen total.

El H<sub>2</sub>S es un gas combustible, pero su gran inconveniente es su alto poder corrosivo al formarse ácido sulfúrico en la mezcla con H<sub>2</sub>O y toxicidad a partir de cierta concentración. La existencia de amoníaco es señal de que existe O<sub>2</sub> en el proceso y por lo tanto que se ha producido un proceso aerobio.

El H<sub>2</sub> es un componente energético su presencia denota una fermentación no

estabilizada y poco optimizada al presentarse en exceso.

### 6.1.2 Biometanización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

Fases de Fermentación Anaerobia. La fermentación anaerobia comprende una compleja serie de reacciones de digestión y fermentación que llevan a cabo diferentes especies bacterianas, en condiciones anóxicas. Este proceso biológico se basa en la transformación, a través de reacciones bioquímicas, de la materia orgánica contaminante en biomasa y en un gas cuyos componentes principales son el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}_2$ , y que se conoce con el nombre de biogás.

Este proceso es uno de los mecanismos más frecuentemente utilizados por la naturaleza para degradar sustancias orgánicas. También se produce una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos), entre los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno y el fósforo, y la totalidad de los elementos minerales (K, Ca, Mg, etc.). Consta de cuatro fases secuenciales desde las primeras descomposiciones microbianas de la materia orgánica hasta la estabilización del producto con la producción del denominado biogás. Estas fases se denominan,

- **Hidrólisis.** El primer paso de la fermentación anaerobia es el proceso de Hidrólisis, que sucede en los polímeros orgánicos como los carbohidratos, lípidos, polisacáridos, grasas y proteínas.
- **Acidogénesis.** Es la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la hidrólisis, como ácidos grasos de cadena larga, ácidos y amino ácidos, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como el ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), pequeñas concentraciones de ácidos grasos volátiles y otros ácidos más complejos. Los principales productos de ésta etapa son ácidos grasos volátiles,  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ .
- **Acetogénesis.** Es la conversión intermedia para la obtención del biogás obteniéndose acetato,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ .
- **Metanogénesis.** Ésta es la parte final en la fermentación anaerobia metanogénica; en esta fase se genera el  $\text{CH}_4$  a partir de la descomposición del



ácido acético o a partir de las reacciones del CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>.

### 6.1.3 Factores que influyen en la producción de biogás

La complejidad de la fermentación o digestión anaerobia refleja la parte biológica de un ecosistema que está influido, por parámetros físicos y químicos. Estos factores son importantes en la tecnología de la digestión anaerobia en donde se incluyen los siguientes: contenido de humedad, temperatura, pH, presencia de nutrientes, compuestos tóxicos en el proceso.

- **Contenido de humedad** La degradación de la materia orgánica se ve favorecida en presencia de agua. Los residuos antes de ser vertidos pueden tener valores variables de contenidos de humedad entre 20 y 60% (Gendebien, 1992). El valor normal de contenido de humedad de los residuos es 35%.
- **Temperatura** El tratamiento de la fracción orgánica de los RSU en los reactores anaeróbicos es llevado a cabo, normalmente, dentro de dos rangos distintos de temperatura: el rango mesofílico, entre el intervalo de temperatura de 25 a 40°C, y el rango termofílico, con temperaturas mayores a los 45°C. Parámetros físicos del proceso, como la viscosidad y la tensión superficial, dependen de la temperatura. En algunos casos, la fermentación anaerobia en el rango termofílico ha mostrado ser más inestable que la fermentación en el rango de condiciones mesofílicas.

Un cambio entre condiciones de rango mesofílico a rango termofílico puede mostrar como resultado inmediato un cambio en la población metanogénica debida a una muerte rápida de los organismos en condiciones mesofílicas.

La metanogénesis es también posible en condiciones de temperaturas menores a los 20°C (condición psicrófilica), pero ocurre a velocidades más lentas y a menor proporción.

- **pH** Cada grupo microbiano involucrado en la fermentación anaeróbica tiene una región de pH específica para su crecimiento óptimo. Para las bacterias

acidogénicas el pH debe variar entre 4,5 a 8, mientras que para las acetógenas, el rango es más estrecho que las anteriores y para las metanógenas entre 6,5 y 7,4. El pH es, además, un importante modulador del sistema, puesto que influye en varios equilibrios químicos, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Por ejemplo, altos pH favorecen la formación de amoníaco libre, inhibidor de la fase metanogénica.

- **Nutrientes** En la degradación anaerobia de RSU mixtos o mezclas de aguas residuales se puede suponer que los nutrientes necesarios y micro nutrientes están disponibles en cantidades ilimitadas. En el tratamiento de un solo residuo o algunas aguas residuales la degradación puede limitarse por la disponibilidad de nutrientes. La adición de elementos de traza como el níquel y el cobalto a la fermentación estimula los procesos anaerobios.
- **Toxicidad** Normalmente se considera que los metanógenos son el grupo bacteriano más sensible a los tóxicos de los microorganismos implicados en la fermentación anaerobia. Sin embargo, se puede dar el caso de una aclimatación o una reversibilidad a ciertos efectos tóxicos. Algunos de éstos efectos comunes en los RSU son los asociados a la presencia de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y ácidos grasos volátiles. La toxicidad de estos compuestos depende del pH.

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno. Y es por eso que en estos cultivos en los digestores anaeróbicos hay también bacterias anaeróbicas que presentan características facultativas en la hidrólisis y en la acidogénesis, pues al presentarse oxígeno es consumido rápidamente por estos.

## 7. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

Para el mejor aprovechamiento de los RSU en relación a la producción de biogás en un vertedero, es necesario realizar una descarga controlada. El tiempo de descomposición depende de factores como la permeabilidad del material de

recubrimiento (tierra u otro), profundidad, contenido de humedad, putrescibilidad de los residuos y grado de compactación y la cobertura final.

Es difícil realizar la estabilidad de los RSU en un vertedero. Los pretratamientos se realizan, en su gran mayoría, para el uso de digestores, no así, cuando la extracción del biogás es directa desde el vertedero. De todas maneras, a medida que se optimiza esta etapa de pretratamiento se mejora la eficiencia del sistema.

Para un mejor aprovechamiento, los residuos deben ser tratados previamente mediante trituración hasta un tamaño de partículas de aproximadamente 7 a 15 cm y separándose los materiales inorgánicos, como metales mediante separadores magnéticos y metales y vidrio mediante cedazos.

Se puede añadir nutrientes, constituidos por lodos de aguas residuales, por el reciclo de los lixiviados, cal y sales ferrosas para controlar los valores de pH y H<sub>2</sub>S, esto se realiza para minimizar la corrosión en la utilización del gas en motores de combustión interna.

Para obtener un mejor aprovechamiento energético es necesario operar de una forma ordenada, esto es que la producción del biogás posea porcentajes estables en sus componentes principales. De esta forma se facilita la estación de bombeo y la red de extracción.

Mediante una red superficial de tuberías, el biogás es conducido hasta una estación donde se le quita la humedad y otras sustancias indeseables, como el H<sub>2</sub>S. Este compuesto al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), que es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños en el sistema mecánico en los motores de combustión interna (MCI). Esto se realiza a través de un sistema de lavado de gases con sustancias como la cal viva, limaduras de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parda o limonita, ricas en sustancias ferrosas. Todas estas operaciones se realizan con el fin de purificar el biogás y tener una combustión limpia y eficiente.

## 7.1 Descripción de sistema integral de captación, conducción y tratamiento del biogás

Para la extracción del biogás se realizan pozos de extracción dependiendo del área de producción de biogás. Se colocan caños de PVC para evitar la corrosión provocada por el  $H_2S$ . La cañería tiene un sector sin perforar que evita infiltraciones, el resto está perforado permitiendo el ingreso del biogás (Figura N° 3).

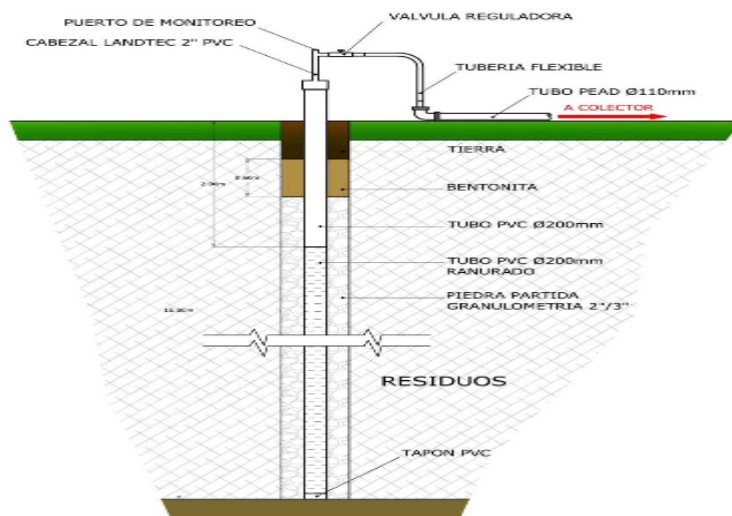


Figura N° 3: Esquema de la extracción de biogás en un vertedero controlado. (Weihs, 2011).

Los pozos pueden alcanzar profundidades de 10 a 30 m y diámetros de hasta 1m (generalmente se utiliza cañería de PVC 0,110) con una longitud en el tramo sin perforar de 6 metros.

Los pozos de captación son perforaciones realizadas mediante sondas de material calibrado, Se trata de captar la mayor cantidad de biogás, sin provocar la entrada de aire en el depósito. La construcción y el funcionamiento de los pozos de captación dependen del radio de influencia que posean, del sellado circundante y de la profundidad (que depende de la altura del residuo acumulado en los puntos de

perforación y características de la masa a perforar) (Figura N° 4).

La salida de los pozos debe de estar conectada a un bombeo que consta con un separador de agua, de un filtro purificador de H<sub>2</sub>S con óxido de hierro que absorbe el H<sub>2</sub>S, que evita la concentración de éste. Esta instalación posee además un filtro de sólidos antes de llegar al soplante, que posee un by-pass para permitir el paso libre del biogás en caso se tenga problemas con el filtro.



**Figura N° 4 Fotos captación vertical. (Weihs, 2011)**

La conducción del biogás extraído se realiza mediante tuberías de polietileno de alta densidad, de pared ciega para evitar la entrada de aire. El espesor de las mismas se tiende a sobredimensionar para aumentar el grado de seguridad de la instalación. Es común para éste tipo de instalaciones utilizar tubería PN6 (de presión de trabajo a 6 bares), aun cuando en la conducción o transporte del biogás se realice en milibares. Una línea de conducción que puede conectar 1 o 2 pozos unen los pozos de captación con los colectores generales de aspiración (Figura N° 5), y se une a las entradas de la estación de regulación y medida. Esta estación es el elemento clave para la adecuada captación del biogás ya que en ella se tomarán las muestras del gas conducido por cada una de las líneas. Las muestras se analizan, y en función de las características de este gas se debe ajustar la aspiración en cada línea.

Cuando el biogás captado por el pozo tiene una concentración de CH<sub>4</sub> inferior a la deseada, se cierra parcialmente la válvula de regulación disminuyendo el caudal de biogás captado. En caso de que el biogás captado tenga un porcentaje mayor al deseado, se aumenta la captación en el pozo.

Se analiza la concentración de oxígeno en el gas con el fin de detectar posibles

filtraciones de aire en el sellado o en las líneas de conducción.

Para evitar cambios bruscos en el sistema de conducción del caudal de gas extraído hacia los grupos de generación y para asegurar la combustión correcta del biogás captado, se emplean dos sistemas simultáneamente:

- Un gasómetro, donde se almacena el biogás y tiene la función de amortiguar las puntas de producción y de consumo.
- Una antorcha, que quema el exceso de biogás captado y que en dicho momento no puede ser consumido en los grupos generadores, ni almacenado en el gasómetro (Figuras N° 6 y 7).

## COLECTOR



**Tuberías laterales provenientes de los pozos de extracción**

**Figura N° 5 Tubería colectora de biogás (Weihs, 2011)**

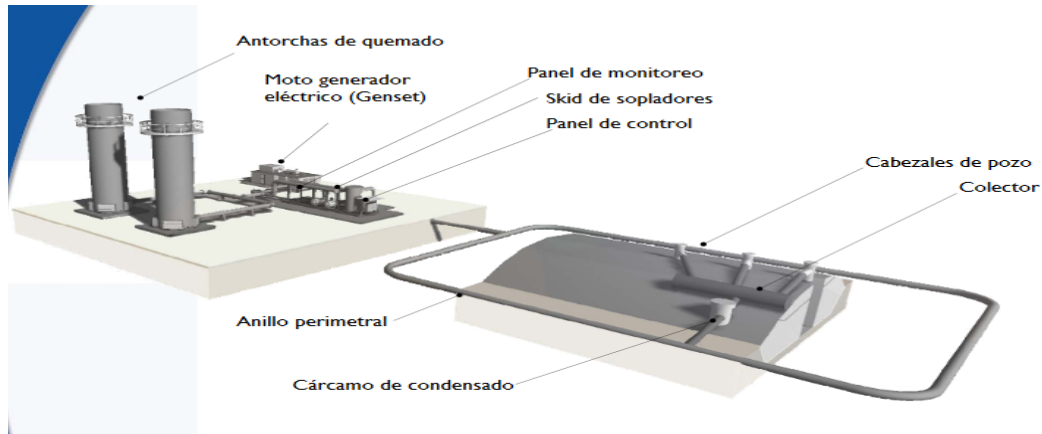


Figura N° 6 Sistema integral de captación y tratamiento de biogás. (Weihs, 2011)

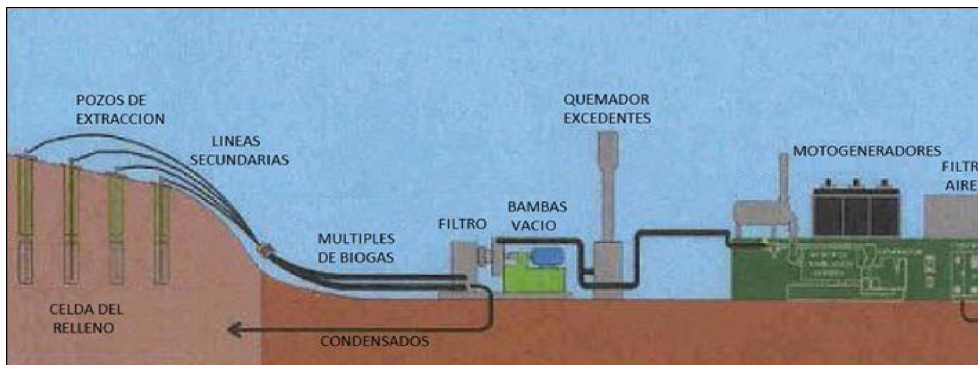


Figura Nª 7.- Proceso desde la captación de biogás del relleno sanitario. (Weihs, 2011)

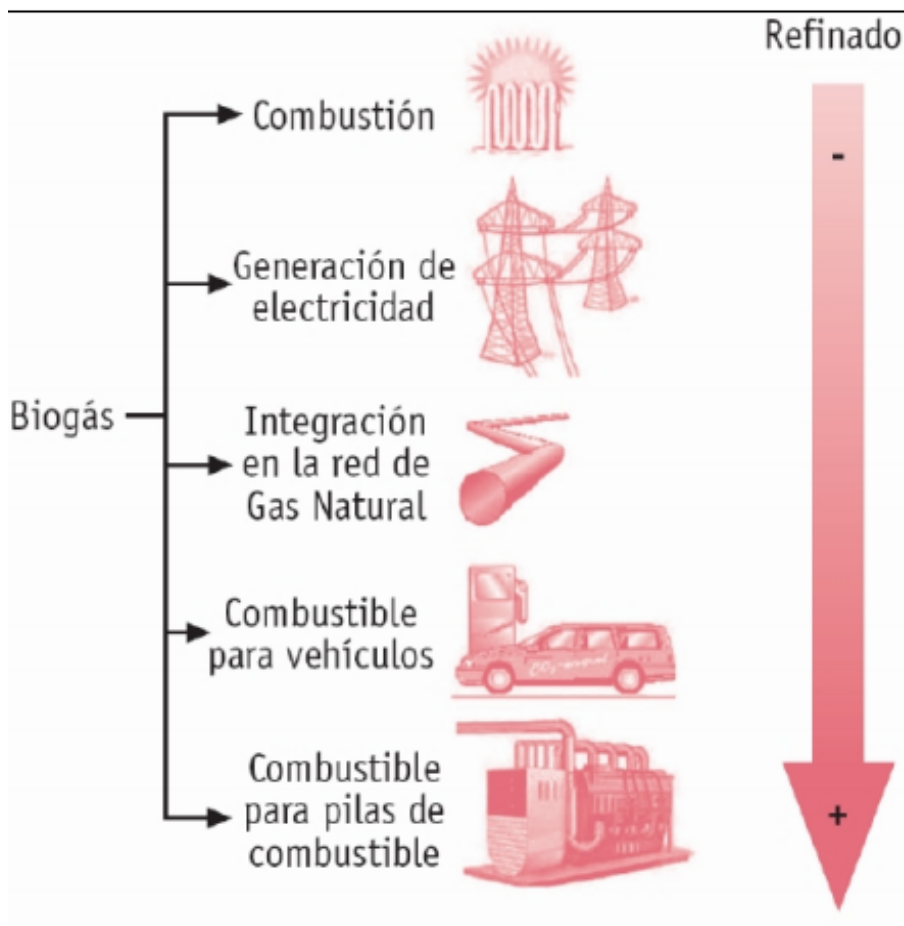
## 7.2 Usos del biogás

El biogás asociado a la generación de energía puede tener diferentes usos

- Generación de electricidad: El biogás extraído del vertedero se lava (extracción de agua mediante enfriado, eliminación de material particulado y eliminación de siloxanos) alimenta motores de combustión interna (MCI) que asociados a alternadores son los responsables de la generación de energía eléctrica.
- Gas natural: Utilizando procesos avanzado para el refinado del biogás, upgrading, se eliminan todas las impurezas y se separa el CO<sub>2</sub>. El biometano que se obtiene puede inyectarse sin inconvenientes en la misma red de suministro que el gas natural.
- Las nuevas tecnologías de Generación, y Cogeneración de Electricidad y Calor

combinados (CHP) dan la alternativa de aprovechar y re- utilizar este calor en sistemas de calefacción y refrigeración, utilizando una sola fuente de combustible como el gas natural, o biogás, capturando el calor generado por este proceso.

- Combustible: se puede utilizar como combustible vehicular, para lo que debe realizarse tratamientos de purificado del biogás a fin de eliminar componentes dañinos para motores y otros equipos.



**Figura N°8 Aprovechamiento del Biogás- Diferentes tipos en función de su grado de purificación. Fuente El sector del biogás industrial en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Elaborado por Miembros de la Mesa de Biogás (2010)**



### 7.2.1 Tratamientos para limpieza de los gases según el uso del biogás

Dependiendo del uso final que tenga el biogás, es necesaria una limpieza del combustible más o menos exhaustiva, para eliminar H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, agua y partículas sólidas, tal y como se muestra en la Tabla N° 4, donde se indica el uso final del biogás y el nivel de tratamiento de purificación requerido. (Quaia, E. 2014. Purificación y utilización del Biogás. Producción de biogás. Especialización en Ingeniería Bioenergética).

Tabla N° 4. Tipo de tratamiento de purificación del biogás según uso final.

NIVEL DEL TIPO DE TRATAMIENTO DEL BIOGÁS SEGÚN SU USO FINAL			
USOS DEL BIOGÁS	ELIMINACIÓN DE AGUA	ELIMINACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO	ELIMINACIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO
Producción térmica en calderas	Parcial	No	No/Parcial/Elevado
Producción eléctrica y térmica en motores de cogeneración	Parcial/Elevado	No/Parcial/Elevado	Parcial/Elevado
Combustibles para vehículos	Elevado	Elevado	Elevado
Red de gas natural	Elevado	Elevado	Elevado
Pilas de combustibles	Elevado	Elevado	Elevado

Fuente: El sector de biogás agroindustrial en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Elaborado por Miembros de la Mesa de Biogás (2010)

En la Figura N°9 podemos observar diferentes tipos de tratamiento de purificación del biogás.

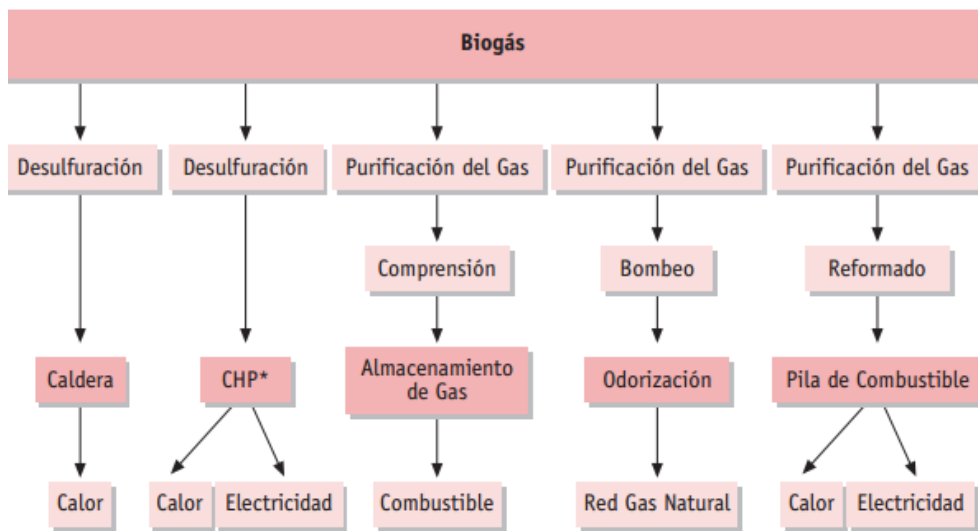


Figura N° 9 - Tipo de tratamiento de purificación del biogás según uso final. (Weiland, 2006)

Los métodos de depuración del biogás más comunes son:

- **Desulfuración:** es el proceso de depuración del biogás más habitual, ya que se encuentra presente en el diseño de todas las plantas.

Existen tres tipos de desulfuración:

- ✓ Microaerofílica: Consiste en la inyección de pequeñas cantidades de aire en el espacio de cabeza del digestor donde se forman unas bacterias sulfooxidantes, que degradan el  $H_2S$ , dando lugar a azufre elemental.
- ✓ Desulfurización biológica externa: se hace pasar al biogás a través de un biofiltro con relleno plástico sobre el que se adhieren las bacterias desulfurizantes; también se elimina  $NH_3$ .
- ✓ Desulfurización por adición de sales férricas: consiste en añadir compuestos férricos al sustrato. De este modo se producen sulfatos insolubles que evitan la salida de azufre en forma de  $H_2S$  al biogás. Con este último método hay que ser muy cuidadoso porque podemos causar la corrosión de los materiales y una gran disminución del pH del proceso.

- **Deshumidificación:** es un proceso de condensación a través de unos tubos refrigerantes que permite la reducción del agua presente en el biogás. Existen otros métodos de deshumidificación menos habituales, como por ejemplo el filtrado del gas, el enfriamiento con agua a una temperatura de 4°C, etc.
  
- **Eliminación de CO<sub>2</sub>:** En el caso en el que se utilice el biogás para cualquier otro proceso que no sea en motores de cogeneración, será necesaria la eliminación del dióxido de carbono. Los métodos posibles son (ordenados en orden creciente en cuanto a su coste y eficiencia):
  - ✓ lavado con agua
  - ✓ lavado con disolventes orgánicos
  - ✓ filtración en carbón activo (el gas circula por el carbón activo, donde se retiene el CO<sub>2</sub>)
  - ✓ separación por membranas (proceso de alta efectividad)
  - ✓ separación criogénica de las materias según el punto de ebullición (proceso que en la actualidad se encuentra en desarrollo)

### **7.3. Sistemas de generación de electricidad. Motores de combustión**

Una primera manera de generar electricidad es mediante el uso de motores de combustión interna, tanto los que usan gasolina (motores de ciclo Otto) como los que funcionan con gasóleo (diésel). El biogás se puede usar como combustible para estos motores, pero previamente deben ser eliminadas las impurezas que pueden afectar al rendimiento y mantenimiento de los mismos.

El biogás tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, lo que hace que sea ideal para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, aunque como contrapartida tiene una baja velocidad de encendido.

El biogás tiene baja capacidad lubricante, presenta un alto contenido en humedad y bajo poder calorífico interno (PCI) o sea es poco detonante. Por ello, los motores de combustión interna que trabajan con biogás deben sufrir algunas modificaciones. Tanto

los motores de encendido por compresión (MEC o ciclo Diesel) como los motores de encendido provocado (MEP o ciclo Otto) deberán estar dotados de un carburador para suministrar la mezcla de aire-gas. Debido a su bajo contenido energético, esta mezcla es difícil de detonar en los motores MEP con la bujía. Una solución consiste en disponer de una cámara de precombustión, que requiere alimentación de biogás a alta presión. El rendimiento del biogás en los motores de ciclo Otto es muy adecuado, ya que sólo existe una merma de la potencia máxima de entre un 20% y un 30%. Estos motores son arrancados con nafta y luego pueden funcionar usando un 100% de biogás. En los motores de ciclo Otto el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases.

En cuanto a los motores diésel, generalmente usan un sistema mixto de biogás y diésel, que permite aplicar distintas proporciones de ambos combustibles y el paso de uno a otro de forma rápida y confiable. Para ello, estos motores añaden un mezclador de gases con un sistema de control, ateniendo el sistema de inyección convencional. Actualmente, esta tecnología es la más usada para generar electricidad, de hecho, existen en España un número considerable de vertederos que producen energía mediante conjuntos de motores y generadores de electricidad alimentados a partir del biogás extraído de sus plataformas de vertido.

### **7.3.1 Sistemas de generación de electricidad. Turbinas de gas**

Una de las alternativas que permite utilizar las turbinas de gas de manera que se obtengan buenos rendimientos es su uso en ciclos combinados. Las ventajas son:

- Requieren menor tiempo de instalación
- Pueden producir electricidad y calor simultáneamente (cogeneración).
- Prácticamente todo el calor de proceso se puede recuperar.
- Pueden operar conectados a la red eléctrica de forma continua.
- Presenta bajo nivel de contaminantes y ruidos.
- Permiten el uso de combustibles de bajo poder calorífico (biogás)

### **7.3.2 Sistemas de generación de electricidad. Micro turbinas**

El concepto de microturbina es el mismo que el de la turbina de gas convencional, pero de un tamaño muy reducido. Las microturbinas son sistemas de cogeneración (obtención de electricidad y calor), adecuados para pequeñas potencias (30 a 200 kW).

Las micro turbinas pueden trabajar con biogás con un contenido en metano del 35%, menor que en los motores de cogeneración. Además, presentan una mayor tolerancia al H<sub>2</sub>S que los anteriores, son menos contaminantes y el mantenimiento necesario es más sencillo que el caso de los motores de cogeneración.

Como inconvenientes podemos indicar, el rendimiento eléctrico obtenido es menor, del orden del 15-30%. Las turbinas dan todo el calor residual en forma de gases de escape, por lo que el aprovechamiento es más simple que en motores

Varias empresas han desarrollado turbinas de pequeña potencia, en torno a los 30 kW, específicamente para uso de biogás. Es una buena alternativa para vertederos pequeños o para aquellos que se encuentran al principio o al final de su vida útil.

## **8. ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR EL METANO PRODUCIDO EN EL TRATAMIENTO DE LOS RSU DISPUESTOS EN UN VERTEDERO**

La evaluación de las emisiones de biogás de los rellenos sanitarios es compleja, debido a que se trata de múltiples fuentes con una alta variabilidad espacial y temporal. Las variables necesarias para el análisis son:

- Cantidad de metano del biogás
- Temperatura de conservación
- Eficiencia de la planta industrial

### **8.1 Modelo matemático para el cálculo del biogás producido en un vertedero sanitario**

Muchos métodos fueron estudiados para poder proyectar el potencial de

generación de biogás desde los RSU.

Podemos citar:

- LandGEM (v.3.02) - EPA E.E.U.U.
- Modelo Mexicano de Biogás, 2.0 - EPA.
- Modelo Ecuatoriano/Centroamericano de Biogás - EPA.
- Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2006).
- GasSim (UK) Modelo MDL-UNFCCC (Herramienta para determinar las emisiones de metano evitadas en CDF RSU)

El modelo más aceptado por IPCC (Intergovernment Panel on Climate Change). (Dominguez, Silva y Bradl; 2008)

Resulta apropiado para el cálculo de emisiones en sitios de descomposición en forma individual y para la predicción de la generación durante la vida útil del relleno utilizando datos de entrada específica el estudio realizado en “Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica” (Panesso, A.F.; Cadena, J.A.; Mora Flores, J.J.; Ordoñez, M.C. 2011).

Se asume que la producción de metano depende sólo de la cantidad de RSU depositado y que el metano generado para el año T (año de estudio) es el resultado de los RSU depositados en el año i mas la generación de metano acumulado por los RSU depositados en los años anteriores al de estudio.

## 8.2 Tasa de producción de biogás

La forma de estimar la tasa de producción de biogás, particularmente la de metano (CH<sub>4</sub>), se presenta en la ecuación (1). Ésta se utiliza para calcular la producción anual de metano

$$(1) Q_{mT} = F \cdot k \cdot L_0 \sum_i^n M_i e^{-k(T-i)}$$

Dónde:

$Q_{mT}$  = Generación máx. de CH<sub>4</sub> en el año T [m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/año].

F = fracción de metano en el biogás [%].

k = constante de generación de metano [ $\text{año}^{-1}$ ]. Depende de factores medio ambientales (humedad, ph, temperatura)

L0 = potencial de generación de metano [ $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ ]. Depende de contenido orgánico de la basura y de la humedad

Mi = masa de residuo dispuesto en el año de inicio de funcionamiento de vertedero [ton].

T= año de estudio (varía desde el año de inicio de funcionamiento, hasta año de clausura)

T= años después de clausura.  $i$  = años desde la apertura hasta el año de estudio.

Lo valores típicos de K y L0 fueron obtenidos de datos de rellenos sanitarios. Estos valores fueron determinados con modelos teóricos y datos de campo (Tabla N° 5).

**Tabla N° 5- Indicadora de producción de metano: K y Lo**

<b>Precipitación anual (mm/año)</b>	<b>K(<math>\text{año}^{-1}</math>)</b>	<b>Lo(<math>\text{m}^3/\text{ton}</math>)</b>
0-249	0,040	60
250-499	0,050	80
500-999	0,065	84
$\geq 1000$	0,080	84

Fuente: Garcia F., 2003

También los valores de K y Lo dependen de la eficiencia del sistema de captación, tomándose entre el 50 y 80% como valores aceptables de eficiencia (Johannessen L.M., 1999).

### **8.3 Determinación de la energía producida por el biogás**

Biogás= % CH<sub>4</sub>+ % CO<sub>2</sub>+ % N<sub>2</sub>+% O<sub>2</sub>+ otros.

El PCI del biogás a partir de los RSU, y sólo considerando el PCI de metano, se calcula:

$$\text{PCI bg} = \% \text{CH}_4 * \text{PCI CH}_4 = 0,60 * 35846,071 \text{KJ/m}^3 = 21507,643 \text{KJ/m}^3$$

El PCI del biogás es variable de acuerdo a la antigüedad del vertedero (se recomienda periódico muestreo). Para facilitar el análisis usamos la siguiente conversión dentro de la energía térmica a eléctrica considerando la eficiencia del grupo turbina - alternador.

$$1 \text{Kcal} = 4,186 \text{ KJ} = 0,001163 \text{ KWh}; 1 \text{KJ} = 2,778 \times 10^{-4} \text{ KWh (A)}$$

$$21507,643(\text{KJ/m}^3) * V(\text{m}^3) = 21507,643 * V = (\text{KJ}) \rightarrow \text{EGB} = \text{PCI Bg} * V = 5,9748 * V = (\text{KWh})$$

El PG es ahora la cantidad de energía térmica que ingresa al ciclo de gas de una planta y para estimar la potencia eléctrica generada.

$$\text{PG} = \text{EGBI} * \gamma * \eta$$

$$\text{EGB} = 5,9748 * V$$

Dónde:

*EGB*= Energía térmica que ingresa a la planta (constante con valor de 5,9748, y dimensiones m<sup>3</sup>kWh calculada).

*V* = volumen de combustible que se quema en dimensiones de m<sup>3</sup>/h.

$\gamma$  = Eficiencia del sistema de recuperación de biogás.

$\eta$  = Eficiencia eléctrica de la tecnología utilizada.



#### 8.4 Caso Overo Pozo

Para la estimación de la cantidad de metano producido en la PDF de Overo Pozo se consideró el año de primer vertido 2015 y de clausura 2040. Se calculó con el modelo antes propuesto, y los datos recopilados sobre el vertedero.

Para el cálculo se supuso una situación desfavorable de baja disposición de masa de residuos, baja fracción orgánica y bajo contenido de metano del biogás.

$$(1) Q_{mT} = F k L_0 \sum_i^n M_i e^{-k(T-i)}$$

Dónde:

.i= 15 años.

F (Overo Pozo) = 60% (valor promedio)

Con los datos obtenidos en caracterización de sitio de la PDF sobre precipitaciones anuales podemos determinar K y L<sub>0</sub> de la Tabla N°3.

$$K_{op} = 0,080 \text{ año}^{-1}$$

$$L_{0\ op} = 84 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$$

Para determinar M<sub>op</sub> se consideró los datos de residuos dispuestos por día en la PDF de 0,65 Kg/hab. día y teniendo en cuenta la caracterización realizada se consideró 45% de fracción orgánica y una población servida al año 2015 de 1.000.000 de habitantes.

$$M_{i\ op} = 0,65 \text{ Kg/hab. día} * 0,45 (\%) * 1.000.000 \text{ hab.} * 365 \text{ días} = 106.762.500 \text{ Kg} = 106.762,5 \text{ ton}$$

$$Q_{mT} = 0,60 * 0,08/\text{año} * 84 \text{ m}^3/\text{ton} \sum_i^n 106.762,5 \text{ ton} * e^{-0,08(0-15)} = 4.899.554 \text{ m}^3/\text{año}_2$$

La producción estimada de metano en Overo Pozo equivale 4.899.554 m<sup>3</sup>/año = 13423,43 m<sup>3</sup>/día = 559,30 m<sup>3</sup>/h

Usando la conversión (A)

1Kcal= 4,185KJ= 0,00163 Kwh ; 1KJ = 2,77810 \* 10<sup>-4</sup>Kwh (A)

EGB = PCI biogas \* V

EGB= 21507, 643(KJ/m<sup>3</sup>) \* V(m<sup>3</sup>) = 21507,643 KJ/m<sup>3</sup> \* 559,30 m<sup>3</sup>= 12,03 10<sup>6</sup> (KJ) = 3850Kwh.

Según datos obtenidos de la empresa de servicio eléctrico de la provincia de Tucumán, EDET SA, el consumo del mes de julio y agosto de 2017 no supera los 5000 Kwh.

## CONCLUSIONES

En relación al funcionamiento actual del vertedero puede decirse,

- El venteo de las emisiones gaseosas provoca daños importantes al entorno y genera condiciones de baja salubridad para el personal de la planta y vecinos del lugar.
- Es factible captar el biogás en las celdas operativas ya que existen pozos verticales para la extracción de los gases y estos pueden conectarse a una red colectora de las nuevas celdas y transportar los gases para su tratamiento.
- Optimizando las condiciones del vertedero mediante separación previa en la planta de transferencia y realizando pretratamientos se puede lograr una mayor producción de biogás
- Se puede determinar mediante este modelo matemático la cantidad de metano producido en el relleno sanitario de Overo Pozo y estimar su conversión a energía eléctrica.
- La energía producida puede ser aprovechada para el uso interno de PDF teniendo en cuenta que hoy consume aproximadamente 5000 KWh. Se debe considerar que se prevé la instalación de planta de tratamiento de lixiviados, lo

que aumentará el consumo en la PDF

- Si el biogás producido en el vertedero de Overo Pozo, que hoy se libera al ambiente sin tratamiento, fuera colectado y se convirtiese el metano del biogás en CO<sub>2</sub>, la contaminación se reduciría, ya que el CO<sub>2</sub> es 21 veces menos contaminante que el CH<sub>4</sub>.
- Teniendo en cuenta que se trata de residuos urbanos, de inagotable generación y que el metano se está produciendo de manera constante en el vertedero, puede considerarse el aprovechamiento del RSU como energía limpia y renovable y viable.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Directrices del IPCC (2006) para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero

Editado por simon Eggleston, Leandro Buendia, Kioko Miwa, Todd Ngara y KiyotoTanabe.Disponible:[http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_Volume5/V5\\_6\\_Ch6\\_Wastewater.pdf](http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf).

Dominguez E.G. , Silva I.R. y Bradl H. (2008) Evaluacion of The methane and electrical Energy potential and carbón creditrevenues from the landfill transmission and distribution . Confrence and exposition latin America IEEE 2006.

García, F. 2003. Determinación cuantitativa y cualitativa de los contaminantes atmosféricos emitidos por la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios, estudio de cas. Relleno Sanitario Curva de Roda Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia.

Gendebien (1992), A. “Landfill Biogas. From Environment to Energy”. Commission of the European Communities. Final Report EUR 14017/1 EN, Luxemburg, 1992.

González, G.L. 2010. Residuos sólidos urbanos Argentina. Tratamiento y disposición final. Situación actual y alternativas futuras. Buenos Aires. ISBN 978-987-26993-5-2.

- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2015. Clima y Agua. Datos históricos. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Gobierno de la Nación Argentina. Disponible en: <http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/>. Página consultada: enero de 2015.
- Miembros de la Mesa de Biogás. 2010. El sector del biogás agroindustrial en España. Disponible en: [http://www.mapama.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010\\_tcm7-5925.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm7-5925.pdf). Página consultada: octubre de 2017.
- Panesso, A.F.; Cadena, J.A.; Mora Flores, J.J.; Ordoñez, M.C. 2011. Análisis de biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica Scientiaet Technica. 1(47): 23-28.
- Quaia, E. 2014. Purificación y utilización del Biogás. Producción de biogás. Especialización en Ingeniería Bioenergética.
- Weihs, J.P. 2011. Concepto Básico sobre Biogás. Global Methane Initiative. Disponible en: [https://www.globalmethane.org/documents/events\\_land\\_201106272\\_weihs.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/events_land_201106272_weihs.pdf). Página consultada: octubre de 2017.
- Weiland, P. (2006). "Biomass Digestion in Agriculture: A succesful pathway for Energy Prod. and Waste Treatment in Germany". Engineering in Life Science. 6 (3):302-309.