

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE SALTA EN UN ESCENARIO FUTURO

Gloria del C. Plaza, Mónica N. Pasculli, Ana L. Moya

Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias Naturales

Univ. Nacional de Salta. Complejo Universitario Gral. San Martín. Av. Bolivia 5150, Salta
Capital, CP 4000.

<http://www.unsa.edu.ar/web/index.php> (54) (387) 4255384. E mail
gplaza507@gmail.com; mnpasculli3@gmail.com; anitalauramoya@gmail.com

RESUMEN: Se efectúa un análisis del potencial energético a partir de la biomasa a disponerse en el relleno sanitario de la Ciudad de Salta ubicado en Finca San Javier, en la trinchera denominada Módulo IV próxima a entrar en operación. Aplicando el Modelo LanGEM v3.02 de U.S.E.P.A, se determinó que la máxima generación de biogás es de 37,73 hm³/año, de donde el 50% es metano, 18,8 hm³/año. Este volumen de biogás si se aprovecha para energía térmica puede generar 100.000.000 Mcal/año con una eficiencia de captura del 50%, o bien, si se instala generadores para biogás, con una energía disponible del 31,8% podría obtenerse 72.000 MWh/año. Esta energía puede cubrir parte de la demanda energética de la población de bajos recursos que vive en la zona de influencia del relleno sanitario. Se estima la energía evitada a partir del reciclaje de residuos plástico, metal y vidrio que llegan a disposición final. Finalmente se analiza las condiciones técnicas, operativas y de gestión de los residuos sólidos domiciliarios para mejorar la eficiencia energética. Se propone un modelo de gestión sostenible de la fracción orgánica y de la fracción reciclable.

Palabras claves: biogás, energía renovable, relleno sanitario, sustentabilidad.

INTRODUCCION

Los residuos sólidos urbanos constituyen una problemática creciente en la Argentina y en América Latina. Una inadecuada disposición de residuos no solo degrada los factores ambientales (suelo, agua, aire, cubierta vegetal, fauna), sino también impacta la salud de la población. En la actualidad, la valoración energética de los residuos es de sumo interés ya que contribuiría al cambio de la matriz energética sustentada en combustibles fósiles, así como también a la mitigación de Gases Efecto Invernadero. El biogás del relleno sanitario se produce mediante la descomposición de la fracción orgánica de los residuos depositados en los vertederos y se compone típicamente por un 35-65% de metano (CH₄), un 15-50% de dióxido de carbono (CO₂) y una mezcla de otros gases, tales como nitrógeno, hidrógeno, gas sulfhídrico, etc. (Panesso,2011).

Las entidades gubernamentales relacionadas con la gestión de los RSU deben enfocar sus esfuerzos en la valorización de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a fin de enmarcar sus acciones para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sustentable propuestos por las Naciones Unidas, principalmente el Objetivo 11 (Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles) y el Objetivo 13 (Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos).

El gobierno argentino elaboró la Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU), en el año 2005, como eje para llevar a cabo una política pública ambiental, aspirando a que la misma fuese implementada en todo el país, en fases de corto, mediano y largo plazo, dentro de un horizonte temporal establecido en veinte años (2006 – 2025).

La Estrategia está basada en el criterio de integralidad (reducción en origen, separación domiciliaria, recolección y transporte, transferencia y regionalización), procesamiento (reciclado de inorgánicos, compostaje de orgánico y otros) y centros de disposición final (CDF).

En la provincia existe una propuesta de regionalización dispuesta en el Plan Provincial para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (PPGIRSU), en el cual funcionan distintos consorcios de residuos en la provincia, algunos formalizados otros no. El caso de estudio corresponde al Consorcio del Área Metropolitana, conformada por los municipios de Capital, Vaqueros, La Caldera, Cerrillos, San Lorenzo y La Merced, no está conformado aún como consorcio, pero funciona como tal (Gobierno de la Provincia de Salta).

La producción de biogás y su uso como combustible vehicular o para inyección a redes se rige por la Ley N° 26.093 de Biocombustibles, se ha extendido la vigencia del Régimen de Promoción para la Producción y Uso Sustentable de Biocombustibles en el presente año por Decreto 456 /2021. Por otra parte, la Ley N° 24.076 de 1992 estableció el Marco Regulatorio de las Actividades de Transporte, Distribución y Almacenamiento de Gas Natural.

Finalmente, cuando el biogás es utilizado para la generación de energía eléctrica, corresponde aplicar la Ley N° 26.191, que fomenta el uso de fuentes renovables destinadas a la Producción de Energía Eléctrica. Esta ley que modifica la Ley N° 27.190 representa un avance, en tanto pone en cabeza de los grandes usuarios de energía eléctrica la obligación de cumplir con las metas de incorporación de energía de fuentes renovables: 8% de su consumo total al 31 de diciembre de 2017 hasta llegar al 20% al 31 de diciembre de 2025.

Una política energética social y ambientalmente sustentable debe repensar tanto la matriz energética actual como la distribución de la producción de energía, de modo que las mejoras en calidad de vida alcancen a toda la población, pero teniendo en mente la conservación ambiental del planeta. Uno de los objetivos enunciados en el marco de la Agenda Post-2015 (Clark, 2015 en Ottavianelli, 2015) para acabar con la pobreza en 2030 es proveer de electricidad a las personas que ahora no la tienen. En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible se menciona la necesidad de un enfoque sostenible respecto al acceso a la energía. La Agenda Post-2015 se encamina hacia la promoción de fuentes de energía renovable y la consecución de la justicia climática, donde el acceso universal a la energía podría ser posible gracias a las energías renovables (Ottavianelli, 2015).

OBJETIVO

Analizar el potencial energético de los residuos sólidos urbanos a disponerse en una nueva trinchera del relleno sanitario de Finca San Javier en la ciudad de Salta y discutir pautas de gestión de los residuos para optimizarlo.

METODOLOGÍA

Descripción del Sitio de disposición final en Salta Capital

El relleno sanitario de la Ciudad de Salta, está ubicado en la zona sudoeste de Salta, las coordenadas de ubicación del mismo son Lat. 24°50'59.67"S y Long. 65°22'55.54"O. Se encuentra cercano a los cursos de agua como el Río Arenales y El Río Ancho, Figura 1, ambos pertenecientes a la Cuenca Arias-Arenales. Es el sitio de disposición final de los residuos generados en los municipios de Salta Capital, Vaqueros, La Caldera, San Lorenzo, Cerrillos, La Merced y Campo Quijano que comprende una población de 1.365.000 habitantes según proyecciones basadas en resultados del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (INDEC,2019).

Para el tratamiento de los residuos se utiliza la técnica de enterramiento o relleno sanitario, que consiste básicamente en la habilitación de trincheras, disposición de los residuos, compactación y cobertura con tierra. Próximamente se empleará el Módulo IV en la disposición. El predio está dividido en tres sectores o módulos, correspondientes al Módulo I (aproximadamente 10 has, con disposición

de residuos en el período 1986 a 1998) y actualmente; Módulo II (aproximadamente 19 has, altura de 12 m, operado durante el período 1999 a Junio 2011); y Módulo III (9 has, cota aproximada de 12 m, en operación desde Junio 2011 hasta aproximadamente 2015). El Módulo de San Javier II tiene instalado un sistema de captura activa de biogás con tuberías verticales que transportan el biogás hasta la planta de combustión. El sistema consiste en aproximadamente 100 tubos verticales de los cuales se encuentran en funcionamiento la mitad. El biogás capturado es transportado a la planta de combustión previa separación de condensados. (Blanco et al, 2017).



Figura 1. Ubicación del relleno sanitario y sus Módulos en la Ciudad de Salta.

La planta de emplazamiento de captura de biogás, en el denominado San Javier II, se basa en una tecnología convencional de captura activa de biogás, representada por cinco sistemas básicos.

1. Sistema de extracción y transporte del biogás compuesto por trincheras de extracción, cabezales para medición y control del biogás, tuberías y accesorios.
2. Un sistema de succión compuesto por ventiladores, válvulas, accesorios y tablero eléctrico.
3. Un sistema de combustión conformado por la antorcha y sus accesorios
4. Un sistema de manejo de condensados compuesto por un condensador y tuberías para la descarga o transporte hasta su destino final
5. Un sistema de monitoreo y control para medir el flujo y la composición del GRS controlando el ingreso de aire al sistema de recolección y optimizando la extracción en los pozos. (Banco Mundial, 2006).

En el Módulo I coexisten las actividades de disposición final de RSU y captura de biogás con operaciones de separación manual de residuos que realizan miembros de la cooperativa de reciclado San Benito 1, que están instalados en la Finca San Javier desde hace varios años y cuentan con autorización del municipio de Salta.

El área de emplazamiento del relleno sanitario con los años fue poblándose y actualmente en sus proximidades se encuentran los barrios Libertad, Convivencia, Fraternidad, Solidaridad, S.I.T.A, Gauchito Gil, Primera Junta, Justicia, Santa Mónica y Urkupiña cuyos habitantes pertenecen a la municipalidad de Salta y se caracterizan por ser de bajos recursos (Figura 2). En éste área de influencia del relleno sanitario viven 12.930 familias de las cuales un 37%, o sea 4.784 familias, reciben la garrafa social de 10 kg para contribuir con su situación de vulnerabilidad económica (Plaza, 2017).



Figura 1. Barrios en el Área de Influencia directa del relleno sanitario (Municipalidad de Salta)
Fuente: IDESA

Estimación y Cálculos de emisiones y demanda energética satisfecha

La generación per cápita para el año 2005 fue de 0,760 kg/día, en el año 2010, la generación de residuos per cápita para la provincia de Salta era de 0,820 kg/día y la generación total de RSU fue de e 890 tn/día (BID, 2012). Finalmente, los pesajes de residuos receptados durante el año 2019 en el mismo relleno sanitario arrojan un valor diario de 755,6 tn.

La composición de los residuos de la provincia de Salta, mencionada en el Informe final para el Proyecto Nacional para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (2009), es de un 50,1% de desechos orgánicos, 9,3% de papeles y cartones, 9,4% de plásticos, 1,4% de vidrios, 2,1% de materiales textiles y 23,6 % de otros residuos.

La proyección de la cantidad de residuos a disponer en la nueva trinchera del relleno sanitario se basó en datos de peso de residuos receptados en el mismo durante el año 2019. Estos fueron proporcionados por el municipio de la Ciudad de Salta. Para calcular los residuos de cada año, hasta el año 2032, a partir del año 2019, se consideró un crecimiento anual de 1,6% según Informe final para el Proyecto Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (2009).

Para la determinación de la generación de biogás, se utilizó el Modelo LandGEM v3.02 (Landfill Gas Emission Model). Este modelo es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, el mismo describe de manera sencilla los cambios complejos que ocurren durante el proceso de descomposición en un relleno sanitario para determinar la cantidad de metano generada a lo largo del tiempo.

Este modelo para la estimación de emisiones de biogás y otros compuestos orgánicos volátiles, ha sido utilizado por diferentes investigadores, para rellenos sanitarios en Perú (Pérez et al, 2018) en Colombia (Martin-Calvo y Castañeda-Gómez, 2021, García y Agudelo, 2005) y también fue comparada con mediciones realizadas en rellenos sanitarios como en el caso de la provincia de Córdoba donde se concluye que el Modelo LandGEM v3.02 arroja valores, en comparación con los determinados por mediciones, dentro de los rangos aceptables (Juárez, 2016), mientras que otros autores como Mendoza et al (2016) y Hernández et al (2016), observaron que este modelo sobreestima las emisiones para las condiciones ambientales de México cuando se utiliza para el cálculo de emisiones valores de k y L_0 convencionales. Finalmente, Chiemchaisri et al (2005) realizaron una comparación de los resultados obtenidos luego de aplicar el modelo por defecto recomendado por el IPCC y el modelo LandGEM de la EPA, para estimar la generación de metano en 142 sitios de disposición de residuos sólidos en Tailandia; y obtuvieron valores menores con el modelo LandGEM (Camargo, 2009).

El modelo está basado en la ecuación de Scholl-Canyon, con la particularidad de que la masa de residuos aceptada en el año i -ésimo es dividida en submasas con el objetivo de lograr un mayor refinamiento del modelo, diferenciándose del modelo de Scholl-Canyon en que éste integra la producción de gas anualmente, en tanto que la última versión del modelo LandGEM v3.02 integra la generación de metano en incrementos de un décimo de año produciendo menores valores de

emisiones respecto de las versiones precedentes para un mismo valor de k. La ecuación se transforma entonces en:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

Donde:

Q_{CH_4} [m³/año] = Generación anual de metano en el año de cálculo n.

i = incremento de un año

n= año de cálculo

j=incremento de 0,1 años

k [años⁻¹] = coeficiente de velocidad de generación de metano

L_0 [m³/Tn] = Potencial de generación de metano

M_i [Tn] = Masas de residuos aceptada en el año i-ésimo

t_{ij} [años] = Edad de la j-ésima sección de la masa de residuos aceptada en el i-ésimo año (expresado en decimales. Ej: 3,2 años).

Para el cálculo de metano se asumió que la composición del gas en volumen es 50% metano y 50% dióxido de carbono.

LandGEM se considera una herramienta de detección: cuanto mejores son los datos de entrada, mejores son las estimaciones. Es por ello, que no se utilizaron los parámetros convencionales que proporciona el modelo (por defecto) sino que se calcularon los mismos de manera de aproximarlos a la situación del relleno sanitario en la ciudad de Salta. Por ello se ajustó los valores de k y L_0 a la composición de los RSU receptados en el relleno sanitario y a las precipitaciones locales.

Para la determinación de los parámetros k y L_0 se utilizó el procedimiento estipulado en el manual Landfill Generation Assesment, Procedure Guidelines (2009). Este manual clasifica los residuos en 3 clases de acuerdo a su composición en: relativamente inerte (RI), moderadamente biodegradable (MB) y biodegradable (B). Los clasificados como relativamente inertes incluyen a los materiales con poca o ninguna posibilidad de biodegradación, tales como metales, vidrios, plásticos, suelo, suelos contaminados, etc. Los considerados como moderadamente biodegradables incluyen materiales con una proporción de carbono biodegradable que se descompondrá a un ritmo lento. En esta clase se incluyen materiales como papel, madera, muebles de madera, productos textiles, materiales de construcción y demolición, etc. Por último, los considerados como biodegradables incluyen a todos aquellos que poseen una gran proporción de carbono biodegradable, con una velocidad de descomposición relativamente elevada, tales como residuos de comida, residuos de jardín, desechos de frigoríficos, etc.

En la Tabla (1) se muestran los valores de k y L_0 según las diferentes clases de residuos considerados para el cálculo de las constantes que fueron utilizadas para aplicar el Modelo LanGEM v3.02. Se tuvo en cuenta la composición de los RSU recibidos en el relleno sanitario de la ciudad de Salta. Así mismo los valores de k corresponden a una franja de precipitación de 500 a 1000 mm/añual, considerando que la ciudad de Salta presenta una precipitación media anual en el rango de 700 a 800 mm (Bianchi y Yáñez, 1992).

| Clase | Proporción en RSU Salta (%) ¹ | K ² | L_0 (m ³ /Tn) ² |
|----------------------------------|--|----------------|---|
| Biodegradable (B) | 57,89 | 0,09 | 160 |
| Moderadamente Biodegradable (MB) | 23,34 | 0,04 | 120 |
| Relativamente inerte (RI) | 13,49 | 0,02 | 20 |

Tabla 1: Valores de tipos de RSU del relleno sanitario y de las constantes k y L_0

El cálculo de K y L_0 , ajustados a la composición de los residuos en la ciudad de Salta, se efectuó

¹ Valores calculados en base a la caracterización de RSU realizada por IATASA para la ciudad de Salta, 2009.

² Fuente: Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines, 2010.

aplicando las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{\%B \times kB + \%MB \times kMB + \%RI \times kRI}{100} \quad (2) \quad L = \frac{\%B \times LB + \%MB \times LMB + \%RI \times LRI}{100} \quad (3)$$

Donde:

K [años⁻¹] = tasa de generación de metano

kB [años⁻¹] = tasa de generación de metano para residuos biodegradables.

kMB [años⁻¹] = tasa de generación de metano para residuos moderadamente biodegradables.

kRI [años⁻¹] = tasa de generación de metano para residuos relativamente inertes.

L [m³/Tn] = Potencial de generación de metano.

LB [m³/Tn] = potencial de generación de metano para residuos biodegradable.

LMB = potencial de generación de metano para residuos moderadamente biodegradables.

LRI [m³/Tn] = potencial de generación de metano para residuos relativamente inertes.

$\%B$ = Porcentaje de residuos biodegradables

$\%MB$ = Porcentaje de residuos moderadamente biodegradables

$\%RI$ = Porcentaje de residuos relativamente inertes.

Se ha calculado la energía térmica y eléctrica generada desde 2023 al 2043. El poder calorífico del biogás suele oscilar entre los 19,6 MJ/m³ y los 25 MJ/m³, valor que depende del material orgánico del que proviene y del proceso utilizado entre otras variables (FAO, 2019). Para los cálculos se considera la generación de biogás anual y se adopta para el mismo un valor calorífico promedio de 22,3 Mj/m³ (igual a 5324 kcal/m³) equivalentes a 6 kW/m³ de energía eléctrica. La eficiencia de captura adoptada es del 50%, valor determinado para los módulos anteriores del relleno de Finca San Javier. (Blanco et al, 2017) y que tiene sus causas en diversos factores que en la práctica influyen en la posibilidad de capturar el volumen total del biogás generado, siendo los más importantes:

- a) Pérdidas de biogás a la atmósfera a través de la superficie o de la migración lateral del gas.
- b) Pérdida de pre-clausura, debido a la descomposición de material orgánico en condiciones aeróbicas.
- c) Efectos de frontera que causan la descomposición anaeróbica incompleta de la capa próxima a la superficie (por ejemplo, intrusión de aire debido a la extracción de gas).
- d) Otras pérdidas tales como lavado de carbono orgánico a través de los lixiviados (Camargo,2009).

La fórmula para el cálculo de la energía calórica obtenida a partir del biogás emitido y capturado en el Módulo IV del relleno es:

$$\text{Energía calórica capturada} = \text{Biogás (m}^3\text{)} \times \text{poder calorífico (kcal/m}^3\text{)} \times \text{eficiencia de captura (0,5)} \quad (4)$$

Para estimar la demanda energética anual por familia tipo y, por ende, las viviendas que pueden beneficiarse con el aprovechamiento del biogás al usarlo como fuente térmica, se tuvo en cuenta el poder calorífico superior promedio del gas en 9.525 kcal/m³ y el consumo mensual de una familia tipo de 203 m³ de gas natural, dato calculado en base a información aportada por el Ente Nacional Regulador del Gas. El valor obtenido es de 23.202.900 kcal anuales por familia tipo.

Para el cálculo de producción de energía eléctrica se tuvo en cuenta los generadores de la marca AQL Engineering, los cuales se caracterizan por ser generadores de alto rendimiento eléctrico, gran flexibilidad de operación, larga duración y bajo consumo de biogás (Ibarrola et all, 2014).

Como se mencionó previamente, cada m³ de biogás contiene aproximadamente el equivalente a 6 kWh de energía eléctrica. Sin embargo, cuando se transforma la energía del biogás en energía eléctrica en un generador preparado para este fin, la energía disponible es de un 31,8% de la energía aportada por el combustible ya que el resto se pierde en forma de calor, pudiendo usarse la misma, previo análisis, para aplicaciones de calentamiento. El cálculo de energía disponible se basa en la siguiente ecuación:

$$\text{Energía eléctrica disponible} = \text{Biogás (m}^3\text{/año)} \times 6 \text{ kWh/m}^3 \times 0,318 \quad (5)$$

Para estimar las familias que pueden cubrir su demanda energética anual, se adoptó un consumo diario per cápita de energía eléctrica para Salta Capital de 1,27 kWh, valor tomado de datos aportados por la Dirección General de Estadísticas. Se proyectó, entonces, un consumo por familia tipo de 1.854,2 kWh/año.

RESULTADOS

Potencial Valorización Energética

Considerando que se encuentra próximo a inaugurarse el Módulo IV del relleno sanitario, se calculó mediante el Programa LandGEM v3.02, la cantidad de metano a generarse en un tiempo de vida útil de 10 años a partir de su operación en el año 2022.

El k y L_0 obtenidos en base a los valores mostrados en Tabla 1, aplicando las ecuaciones 2 y 3 respectivamente es de $0,06 \text{ año}^{-1}$ y $123 \text{ m}^3/\text{tn}$.

La Tabla 2 muestra los valores proyectados de residuos a disponerse en la nueva trinchera en un periodo de vida útil de 10 años. En la misma Tabla se muestran los valores obtenidos de emisiones de biogás, metano y dióxido de carbono observándose que el pico de generación se obtendría en el año 2033.

En la Figura 2 se observa la curva de biogás y metano acumulados en hectómetros cúbicos al año.

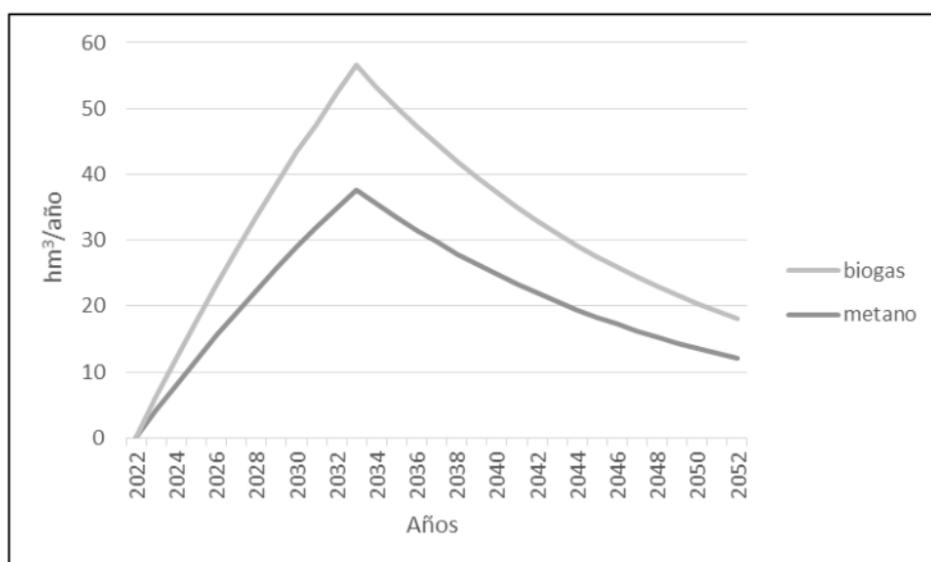


Figura 2: Biogás y metano acumulados hasta el año 2052.

La Tabla 2 presenta los valores de energía térmica y energía eléctrica estimada en 30 años, tanto en operación durante 10 años, como en pos clausura del Módulo IV. El pico de biogás acumulado calculado es $37,73 \text{ hm}^3/\text{año}$, de donde el 50% es metano, $18,8 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este volumen de biogás si se aprovecha para energía térmica puede generar $100.000.000 \text{ Mcal/año}$ con una eficiencia de captura del 50%, o bien, si se instala generadores para biogás, con una energía disponible del 31,8% podría obtenerse 72.000 MWh/año .

| AÑO | RSU (tn/año) | BIOGAS (hm³/año) | METANO (hm³/año) | ENERGIA CALORICA Mcal/año | DEMANDA SATISFECHA (Nºfamilias) | ENERGIA ELECTRICA Mwh/año | DEMANDA SATISFECHA (Nºfamilias) |
|------|--------------|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 2022 | 289247,76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2023 | 293875,72 | 4,156 | 2,078 | 11.100.000 | 477 | 7.930 | 4.280 |
| 2024 | 298577,74 | 8,137 | 4,068 | 21.700.000 | 934 | 15.500 | 8.370 |
| 2025 | 303354,98 | 11,953 | 5,977 | 31.800.000 | 1.370 | 22.800 | 12.300 |
| 2026 | 308208,66 | 15,616 | 7,808 | 41.600.000 | 1.790 | 29.800 | 16.100 |

| | | | | | | | |
|------|-----------|--------|--------|-------------|-------|--------|--------|
| 2027 | 313140 | 19,135 | 9,568 | 50.900.000 | 2.200 | 36.500 | 19.700 |
| 2028 | 318150,24 | 22,52 | 11,126 | 59.900.000 | 2.580 | 43.000 | 23.200 |
| 2029 | 323240,64 | 25,78 | 12,89 | 68.600.000 | 2.960 | 49.000 | 26.500 |
| 2030 | 328412,49 | 28,923 | 14,461 | 77.000.000 | 3.320 | 55.000 | 29.800 |
| 2031 | 333667,09 | 31,958 | 15,579 | 85.100.000 | 3.670 | 61.000 | 32.900 |
| 2032 | 339005,76 | 34,891 | 17,446 | 92.900.000 | 4.000 | 66.600 | 35.900 |
| 2033 | | 37,73 | 18,865 | 100.000.000 | 4.330 | 72.000 | 38.800 |
| 2034 | | 35,533 | 17,766 | 94.600.000 | 4.080 | 67.800 | 36.600 |
| 2035 | | 33,464 | 16,732 | 89.100.000 | 3.840 | 63.800 | 34.400 |
| 2036 | | 31,515 | 15,757 | 83.900.000 | 3.620 | 60.100 | 32.400 |
| 2037 | | 29,68 | 14,84 | 79.000.000 | 3.410 | 56.600 | 30.500 |
| 2038 | | 27,951 | 13,975 | 74.400.000 | 3.210 | 53.300 | 28.800 |
| 2039 | | 26,323 | 13,161 | 70.100.000 | 3.020 | 50.200 | 27.100 |
| 2040 | | 24,79 | 12,395 | 66.000.000 | 2.840 | 47.300 | 25.500 |
| 2041 | | 23,347 | 11,673 | 62.200.000 | 2.680 | 44.500 | 24.000 |
| 2042 | | 21,987 | 10,993 | 58.500.000 | 2.520 | 42.000 | 22.600 |
| 2043 | | 20,707 | 10,353 | 55.100.000 | 2.380 | 39.500 | 21.300 |
| 2044 | | 19,501 | 9,75 | 51.900.000 | 2.240 | 37.200 | 20.100 |
| 2045 | | 18,365 | 9,182 | 48.900.000 | 2.110 | 35.000 | 18.900 |
| 2046 | | 17,296 | 8,648 | 46.000.000 | 1.980 | 33.000 | 17.800 |
| 2047 | | 16,288 | 8,144 | 43.400.000 | 1.870 | 31.100 | 16.800 |
| 2048 | | 15,34 | 7,67 | 40.800.000 | 1.760 | 29.300 | 15.800 |
| 2049 | | 14,444 | 7,223 | 38.500.000 | 1.660 | 27.600 | 14.900 |
| 2050 | | 13,605 | 6,803 | 36.200.000 | 1.560 | 26.000 | 14.000 |
| 2051 | | 12,813 | 6,407 | 34.100.000 | 1.470 | 24.400 | 13.200 |
| 2052 | | 12,067 | 6,034 | 32.100.000 | 1.380 | 23.000 | 12.400 |

Tabla 2: Proyección de cantidad de RSU, emisiones de gases, rendimiento energético y demanda satisfecha en el tiempo de vida útil del Módulo IV

| Residuos | tn utilizadas | Disminución de energía utilizada en reciclado primario (millones de Cal/tn) ³ | Energía aprovechada kcal | Puestos de trabajo (indicador por 10.000 tn anuales y según tecnología⁴) |
|--------------------------------------|----------------------|---|---------------------------------|--|
| Total dispuesto en relleno (10 años) | 3.448.881 | | 1,43 | 34 |
| Reciclado de plástico | 324.194,8 | 13.558,02 | 4.395.439,6 | 297 |
| Reciclado de vidrio | 126.918,8 | 680,84 | 86.411,4 | 26 |
| Reciclado de latas de acero | 7.242,6 | 5.169,36 | 37.439,6 | 2 |
| Reciclado de latas de aluminio | 3.104 | 52.172,73 | 161.944,1 | 1 |

Tabla 3: Análisis de energía aprovechada, incorporando reciclado

³ Determinado de un proceso convencional de reciclado.

⁴ Fuente: Institute for Local Self-Reliance, 1997.

En Tabla 3, se observa que, si se incorpora el reciclado de las fracciones determinadas en sitio de disposición final como plásticos, vidrio y latas de aluminio y acero, se evita el consumo de 71.580 Mcal que sería utilizada en la producción de materia prima, evitándose la generación de Gases Efecto Invernadero (GEI) además de los reducidos con el aprovechamiento energético del biogás de la trinchera, lo que implica una propuesta para mejorar la problemática del cambio climático.

Cabe mencionar que un manejo propicio de trinchera para generar biogás en forma eficiente, no solo consiste en planificar la disposición de manera de conocer la evolución temporal de las celdas reconociendo los periodos de fermentación ácida y metanogénica, sino desviar del sitio de disposición final las fracciones reciclables de plástico vidrio, latas de acero y de aluminio. De este modo se colabora en la prolongación de la vida útil del relleno, como así también, en la eficiencia de captura del biogás. Se calcula, entonces, que la cantidad de energía disponible en 10 años proveniente del biogás de la trinchera y del reciclado de las fracciones mencionadas llega a 540604681,233 Mcal.

Sustentabilidad del relleno con aprovechamiento energético

Impacto social

El aprovechamiento energético es, sin duda, un beneficio social. En el área de influencia del relleno sanitario viven 12.930 familias de las cuales un 37%, o sea 4.784 familias, reciben la garrafa social de 10 kg para contribuir con su situación de vulnerabilidad económica. En el año 2023, si se destina el biogás para cubrir la demanda de energía térmica, 477 familias del área de influencia del relleno sanitario pueden sumarse a las beneficiarias ya existentes, y en el año 2033, con el pico de generación de biogás, podrían ser 4.330 familias las que pueden sumarse. Analizado desde el punto de vista de sustitución de las garrafas actualmente aportadas por el estado, en el año 2033 se podría cubrir el 90% de las familias que demanda esta ayuda social.

La generación eléctrica con gas de relleno sanitario trae pocos puestos de trabajo (máximo 5) si esta alternativa es comparada con la simple quema del gas en una antorcha. Si la línea base no contempla la recolección del gas, el proyecto completo de diseño e instalación de ductos para recuperación de gas generaría aproximadamente unos 20 puestos de trabajo mientras dure la fase de instalación y montaje. El reciclado incorpora 326 puestos de trabajo.

Impacto económico

Este tipo de proyectos presentan varias oportunidades de ingresos económicos: una de ellas es la venta de energía eléctrica al sistema nacional interconectado. En el caso de industrias cercanas al relleno sanitario, como lo es la cerámica, se puede pensar en la oportunidad de vender el gas recuperado transportado a través de un gasoducto (de PVC), para su uso en calderas, calentadores, etc. Para lograr un mejor rendimiento económico es necesario tener en cuenta que los sistemas de captura de biogás deben ser diseñados correctamente desde el inicio de la construcción de la trinchera, ya que modificaciones o correcciones durante la etapa de operación encarecen el proceso de captura. Debe considerarse el pretratamiento de deshumificación y purificación para extraer el sulfuro de hidrógeno y siloxanos, que tendrán un tiempo de vida útil más largo en la medida que los residuos peligrosos y de construcción y demolición sean gestionados en forma separada de los residuos urbanos y de esa manera no contribuyan a la generación de estos gases. Por la dimensión del relleno sanitario y su potencial generación de biogás se considera que una moto-generador de combustión interna es el equipo apropiado y que puede comenzarse con uno de unas 300 kW de potencia de manera de ir sumando otros si resulta favorable la cantidad de biogás que se genera. Las condiciones de operación en la trinchera, específicamente, el buen ordenamiento de las celdas diarias y la mayor compactación de los residuos permiten elevar la cantidad de biogás generado y un mejor manejo del mismo.

Para realizar una evaluación económica financiera será necesario tener en cuenta flujo de fondos, parámetros económicos, inversiones iniciales, costos operativos, ingresos, ingresos-egresos, impuestos, flujo de fondo neto, depreciación, utilidades, factor de actualización, VA utilidades, VA acumulado, VAN y TIR. Para aportar cantidades aproximadas, puede decirse que una TIR de alrededor de un 35% sería aceptable y más que correcta en los tiempos actuales.

Una externalidad negativa puede ser la composición físico-química de la materia orgánica contenida en los residuos, por lo que si se realiza la separación de los residuos podemos mejorar la composición del biogás y su rendimiento, convirtiendo esta externalidad negativa en positiva. La valoración de

externalidades en los proyectos permite prevenir posibles problemas a futuro y de esta forma mejorar la vida útil del proyecto de captura y aprovechamiento energético del biogás.

Impacto ambiental

La captación de gas de relleno sanitario para aprovechamiento energético presenta importantes beneficios en comparación a un relleno sanitario simple (que no recupera el gas) debido a que el metano contenido en este gas es 21 veces más contaminante desde el punto de vista de calentamiento global, en un horizonte de vida de 100 años. Si se compara esta alternativa con la quema simple del gas recuperado, también representa beneficios ambientales ya que la energía eléctrica generada está substituyendo una cantidad equivalente de energía que debería ser generada por el sistema nacional, caracterizado por un importante componente termoeléctrico basado en el combustible fósil que dejaría de ser consumido. La captura de biogás reduce la afectación a la salud de la población vecina al relleno sanitario, al mejorar la calidad del aire.

CONCLUSIONES

El modelo aplicado permite estimar la producción de biogás y el potencial energético a valorizar en los próximos 10 años de operación y siguientes años de clausura de la nueva trinchera del relleno sanitario de la ciudad de Salta. El manejo apropiado del nuevo módulo del relleno sanitario en Salta Capital puede dar lugar a la captura de biogás en forma eficiente para su posterior aprovechamiento satisfaciendo la demanda de las familias vulnerables del entorno del relleno sanitario. La recuperación de fracciones de plástico, vidrio, latas de acero y de aluminio, constituye una alternativa más para reducir indirectamente el consumo energético al reciclarse. De este modo se colabora en evitar la saturación del relleno y se favorece la eficiente captura de biogás. Se calcula que la cantidad de energía disponible en 10 años proveniente del biogás de la trinchera y del reciclado de las fracciones mencionadas llega a 540604681,233 Mcal.

La sustentabilidad en el manejo del relleno sanitario, se logra con captura eficiente del biogás y aprovechamiento en energía eléctrica y/o térmica y alto porcentaje de reciclado. Con estas pautas se logran impactos positivos en la dimensión social, ambiental y económica de la zona, tal como la cobertura de parte de la demanda energética de la población del área de influencia del relleno sanitario, que se caracteriza por ser de escasos recursos económicos, la generación de un total de 360 puestos de trabajo y la reducción del efecto invernadero.

Así mismo, los análisis económicos convencionales no introducen costos/beneficios externos, como desarrollo de capacidades locales, reducción de la contaminación ambiental, creación de empleo local, por eso la necesidad de que se incorporen las externalidades al análisis, ya que un proyecto puede resultar inviable económicamente por ejemplo para el Estado pero puede resultar beneficioso para la comunidad. La inversión que se necesita para generar este tipo de proyecto de aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbano, depende de la escala en que se quiere implementar.

Los factores mencionados en el análisis de los impactos ambientales, sociales y económicas pretenden aportar una serie de criterios a tener en cuenta para los tomadores de decisiones.

REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2012). ENGIRSU. Préstamo del BID 1868 OC/AR.
- Banco Mundial. (2006). Sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de Salta. Auditoría Ambiental. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Olavarría. Argentina.
- Bianchi A. R., C.E. Yañez. (1992) Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino 2da Ed. INTA EEA. Salta.
- Blanco G.; E. Santalla; V. Córdoba; A. Levy. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos. Un análisis teórico-práctico. Centro de Tecnologías Ambientales y Energía. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Camargo, Y.; A. Vélez (2009). II Simposio I Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. REDISA. Colombia. <http://www.redisa.net/doc/artSim2009>.

- Dirección General de Estadística de Salta. Recuperado el 14/08/21. <http://estadisticas.salta.gov.ar/web/level3/2/5/131/103/null>.
- Empresa Distribuidora de Electricidad de Salta S.A. Recuperado el 12/08/21. <http://edesa.com.ar>.
- Ente Nacional Regulador del Gas. Recuperado el 12/08/21. <http://enargas.gob.ar>.
- FAO. (2019). Guía Teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documento técnico N°12. Buenos Aires.
- Gobierno de la Provincia de Salta. Secretaría de Ambiente. Plan Provincial de Gestión Integral de los RSU (PPGIRSU).
- Informe final. Proyecto Nacional para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos BIRF 7362-AR. Revisión y Complementación del Plan Provincial de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos para la Provincia de Salta. (2009). IATASA Ingeniería.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (2010). www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135
- Instituto Nacional de Estadística y Censo de la República Argentina. [https://www.indec.gob.ar › proy_1025_depto_salta](https://www.indec.gob.ar/proy_1025_depto_salta).
- Ministry of Environment of British Columbia (2010). Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines. Provincia de British Columbia, Canadá.
- Ottavianelli, E.; C. Cadenas (2015). Calidad de vida y acceso a la energía: dos casos de estudio. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, pp.12.47-12.56.
- Panesso, A.F.; J.A. Cadena; J.J. Mora Flores; M.C. Ordoñez (2011). Análisis de biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica Scientia et Technica. 1(47): 23-28.
- Plaza G. 2017. Auditoría de cumplimiento Socio Ambiental Inicial del “Relleno Sanitario San Javier” en la Provincia de Salta. Inédito.
- United States Environmental Protection Agency (2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide.

ENERGY ANALYSIS OF URBAN SOLID WASTE IN THE METROPOLITAN AREA OF THE CITY OF SALTA IN A FUTURE SCENARIO

ABSTRACT: An analysis of the energy potential is carried out from the biomass to be disposed of in the sanitary landfill of the City of Salta located in Finca San Javier, in the trench called Module IV, which is about to start operating. Applying the LanGEM v3.02 Model from U.S.E.P.A, it was determined that the highest biogas generation is 37, 73 hm³/year, of which 50% is methane, 18, 8 hm³/year. This volume of biogas, if it used for thermal energy, it can generate 100.000.000 Mcal/ year with a capture efficiency of 50%, or, if generators for biogas are installed, with an available energy of 31.8%, it could to obtain 72.000 MWh /year. This energy can cover part of the energy demand of the low-income population living in the area of influence of the landfill. The energy saved is estimate from the recycling the plastic, metal and glass fraction that reaches final disposal. Finally, the technical, operational and management conditions of household solid waste are analyzed to achieve high-energy efficiency. A sustainable management model for the organic fraction and the recyclable fraction is proposed.

KEYWORDS: biogas, renewable energy, landfill, sustainability.