

## Metodología para analizar las variables que impactan en la viabilidad de un proyecto para generar energía a partir de un SDF. Estudio de caso: Pachuca, Hidalgo

Methodology to analyze the variables that impact the viability of a project to generate power from an SDF. Case Study: Pachuca, Hidalgo.

Oscar Montaña Arango<sup>1\*</sup>, José Ramón Corona Armenta<sup>1</sup>, Humberto Iván Navarro Gómez<sup>1</sup>, Israel Palma Quiroz<sup>1</sup>, Héctor Rivera Gómez<sup>1</sup>, Marco Antonio Montufar Benítez<sup>1</sup>

Área Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo. Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C. P. 42184. Tel. (771) 7172000, ext. 4001.

Correo electrónico [omontano@uaeh.edu.mx](mailto:omontano@uaeh.edu.mx)

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Se presenta una metodología que integra variables internas y externas, en tres estadios, que determinan la viabilidad de un proyecto de generación de energía eléctrica, a partir del biogás captado del sitio de disposición final (SDF) del municipio de Pachuca, Hidalgo. Primero, se analiza el SDF a nivel técnico-financiero, con una proyección de 20 años, con y sin certificados de carbono, resultando viable el proyecto. El segundo estadio (regional) determina que las variables que más impactan son los tiempos de gestión municipal, los aspectos legales y sociales y la sensibilización de actores. El tercer nivel (ambiente macro) considera que el precio de certificados de carbono, apoyos federales y aspectos ambientales permiten que el proyecto tenga proyección para la gestión municipal. Las variables que más impactan al proyecto son: períodos municipales, sensibilización de actores políticos y población afectada, así como la asesoría de expertos en la materia que asocien las variables como un proyecto integral.

**Palabras clave:** Metodología; residuos sólidos urbanos; biogás; energía eléctrica; viabilidad.

### Abstract

This research presents a methodology that integrates internal and external variables, in three stages, that determine the viability of a project of electric power generation from the captured biogas of the *sitio de disposición final* (SDF) in the municipality of Pachuca, Hidalgo. First, the SDF is analyzed at a financial level, with a projection of 20 years, with and without carbon certificates, resulting in a viable project. The second goal (regional) determines that the variables impacting the most are the times of municipal management, the legal and social aspects, and the consciousness of actors. The third level (macro setting), considers that the carbon prices, federal support, and environmental certificates allow the project to be promising for the municipal management. The variables that mostly impact the project are municipal periods, awareness of the affected population and political actors, as well as expert advice in the subject involving the variables as an integral project.

**Keywords:** Methodology; urban solid waste; biogas; electricity; viability.

Recibido: 1 de agosto de 2017

Aceptado: 26 de septiembre de 2018

Publicado: 2 de septiembre de 2019

**Como citar:** Montaña-Arango, O., Corona-Armenta, J. R., Navarro-Gómez, H. I., Palma-Quiroz, I., Rivera-Gómez, H., & Montufar-Benítez, M. A. (2019). Metodología para analizar las variables que impactan en la viabilidad de un proyecto para generar energía a partir de un SDF. Estudio de caso: Pachuca, Hidalgo. *Acta Universitaria* 29, e2041. doi. <http://doi.org/10.15174. au.2019.2041>

## Introducción

Los proyectos de aprovechamiento del biogás generado en los sitios de disposición final (SDF) para generar energía no han tenido el impacto esperado en México, a pesar de ser uno de los países que más produce residuos sólidos urbanos (RSU) *per cápita* (Hoorweg, Bhada-Tata & Kennedy, 2013; Rawat & Ramanathan, 2011) y de que existen 1881 SDF (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2011). En proyectos de generación de energía por otras alternativas, tanto en México como en el mundo, tienen un gran impacto y aprovechan su inserción en los mercados de carbono (Pascual, Ruiz, Flotats & Fernández, 2011; Secretaría de Energía [Sener], 2012; 2016).

Entre los factores detectados que hacen lento u obstaculizan el desarrollo de proyectos a partir de SDF destacan: metodologías utilizadas, cuestiones económicas (falta de financiamientos, interés y apoyo gubernamental), desconocimiento de procedimientos técnicos, legislación confusa en la materia, tiempos políticos, sensibilización de la población y procesos burocráticos.

En México existe un proyecto representativo del aprovechamiento del biogás generado de un SDF para producir energía eléctrica: el relleno sanitario de Salinas Victoria, Nuevo León, proyecto pionero en Latinoamérica (Aguilar, Armijo & Taboada, 2009; Arvizu, Huacuz & Saldaña, 2006). En el año 2011, la Sener (2012) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE) otorgaron diez permisos para generar energía a partir del biogás, seis de ellos en la modalidad de autoabastecimiento. Para 2012 se tenían registradas seis centrales de biogás con una capacidad de 47 MW y tres en proceso con una capacidad de 35 MW (Sener, 2015).

Respecto a los beneficios de estos proyectos, destacan las ventajas económicas que ofrecen los mercados de carbono (López, Romero, Toache & García, 2016), la sustitución de energéticos fosiles, la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), mejora de la imagen urbana, mitigación de olores, mejora en la economía del lugar por la derrama económica, beneficios a la imagen de los gobiernos municipales, y ahorro de energía a municipios por los convenios con la planta generadora (Johari, Ahmed, Hasmin, Alkali & Ramli, 2012; Vera-Romero, Estrada-Jaramillo, Martínez-Reyes & Ortiz-Soriano, 2015; *World Bank* [WB], 2004).

Existen investigaciones como las de Aguilar, Armijo & Taboada (2009), Pascual *et al.* (2011), Stege & Dávila (2009) y Vera *et al.* (2015) que focalizan sus trabajos en el análisis técnico-financiero.

Se ha detectado la importancia de desarrollar una metodología que tome en cuenta la relación existente entre las variables propias del sitio de disposición final (endógenas), así como variables políticas, sociales, ambientales y económicas, entre otras (exógenas), que permitan valorar, desde una perspectiva sistémica, den un acercamiento a la realidad del medio donde interactúa y sirva como instrumento para la toma de decisiones en el desarrollo de este tipo de proyectos.

Por lo anterior, se desarrolla una metodología que permite la integración de variables internas y externas para la evaluación de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de biogás captado de un SDF.

## Materiales y Métodos

### RSU

Uno de los problemas más graves de las grandes ciudades es la disposición final de los RSU. En muchos de los asentamientos urbanos del mundo, el almacenaje se realiza en forma de vertedero (SDF), lo cual

comenzó a ser una práctica desde la Revolución Industrial (Tron, 2010). En el año de 1930, las ciudades de Nueva York y Fresno, California, iniciaron la compactación de los residuos con equipo pesado y cubriéndolos; así fue inventado el término Relleno Sanitario (RS) (Secretaría de Desarrollo Social [Sedesol], 1996).

En México se debe cumplir con los lineamientos de la norma oficial mexicana de protección ambiental NOM-083-SEMARNAT-2003 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2015), la cual regula los SDF de RSU.

Todos los RSU experimentan cierto grado de descomposición, pero la fracción orgánica es la que tiene los cambios más importantes en su degradación y en un tiempo más rápido. Los subproductos de la descomposición están integrados por una mezcla de gases, líquidos y sólidos, generándose a través de procesos químicos y biológicos (Varnero, 2011), lo cual se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Descomposición de los RSU.

| Residuos  | Procesos                    | Subproductos               |
|---|-----------------------------|----------------------------|
| Materiales orgánicos (alimentos, residuos de jardinería, papel, etc.) | Biológico (microorganismos) | Líquidos, gases y sólidos. |
| Residuos inorgánicos (metales).                                       | Químico (oxidación)         | Compuestos de metales.     |
| Otros residuos  | Biológicos y químicos.      | Según el tipo de residuos. |

Fuente: Sedesol (1996).

Los factores que afectan la velocidad de descomposición de los RSU son:

- Tamaño
- Composición
- Oxígeno
- Forma
- Componentes químicos
- Humedad
- Densidad
- Número y distribución de microorganismos
- Temperatura
- pH

El manejo inadecuado de los residuos sólidos afecta la salud humana, la atmósfera, el suelo, y las aguas superficiales y subterráneas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2009).

## Biogás

El biogás es el principal producto de la degradación de la materia orgánica; llamada descomposición anaerobia (en ausencia de oxígeno). Los dos principales gases formados son metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y, en menor medida, compuestos orgánico-volátiles, ácido sulfhídrico y vapor de agua (Tchobanoglous, Theisen & Vigil, 2004). Las concentraciones de CH<sub>4</sub> fluctúan entre 50%-55% y 45%-50% para el CO<sub>2</sub>, lo cual equivale a un valor energético del biogás entre 4.5 y 5.0 kilocalorías por m<sup>3</sup> (Sedesol, 1996).

De acuerdo con Terraza, Bartone & Grajales (2005), para desarrollar un proyecto de generación de energía eléctrica a partir del biogás se debe considerar la inclusión del financiamiento con bonos de carbono para incentivar la factibilidad y contar, como mínimo, con las siguientes características del SDF:

- Más de 100 toneladas de RSU dispuestos diariamente
- Celdas con más de 10 m de profundidad
- Más de un año de operación
- Máximo un año de tiempo transcurrido desde la fecha de cierre
- Acceso controlado

De acuerdo con Vera *et al.* (2015), Johari *et al.* (2012), Gutierrez *et al.* (2011) y WB (2004), los beneficios esperados de estos proyectos son los que se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Beneficios que aportan los proyectos de biogás.

| <b>Ambientales</b>  | <b>Económicos</b>  |
|---|--|
| Reducen las emisiones de metano al medio.   | Generan trabajo y ganancias.                                       |
| Evitan 5 kg CO <sub>2</sub> por kWh quemado de CH <sub>4</sub> .  | Contribuyen a solventar los gastos de operación y mantenimiento.   |
| Mitigan el efecto invernadero y cambio climático.   | Son recursos energéticos disponibles y competitivos.               |
| Controlan riesgos de incendios, intoxicaciones, malos olores, quejas, etc.  | Mayor estabilidad en precios de generación que otras alternativas. |
|   | Ventajas económicas que ofrecen los mercados de carbono.           |
| <b>Energéticos</b>  | <b>Ahorro de energía a nivel municipal</b>                         |
| El Metano es un gas con un alto potencial calorífico.   | En alumbrado público.  |
| Opción para generar energía las 24 horas del día, disponible durante la vida útil del proyecto.                             | En edificios.  |
|   | En bombeo.   |
|   | Por uso de gas metano en vehículos.                                |
| <b>Tarifas e inversiones</b>  |  |
| Los municipios reciben energía eléctrica a precios por debajo de las tarifas oficiales vigentes.                            |  |
| Seguridad a largo plazo en la tarifa, no depende del precio de los combustibles de uso común o de la fluctuación monetaria. |  |
| Por lo general, el municipio no requiere realizar ninguna inversión.  |  |

Fuente: Elaboración propia con base a Vera *et al.* (2015), Johari *et al.* (2012) Gutierrez *et al.* (2011) y WB (2004).

## Zona de estudio

Características del municipio de Pachuca de Soto

El municipio de Pachuca, Hidalgo, tiene una superficie de 195.30 km<sup>2</sup> (0.93% de la superficie del estado) y cuenta con 277 375 habitantes al año 2015, representando el 9.7% de la población estatal (INEGI, 2015). El clima es templado semi-frío y con lluvias en verano, su precipitación pluvial es de 400 mm a 800 mm anuales. Los vientos son dominantes durante 8-9 meses del año, con velocidad máxima de 65 km/h. La temperatura anual varía de 17 °C a 24 °C.

### Características del SDF

El SDF del municipio de Pachuca se localiza en la localidad del Huixmi, donde se realizan las actividades de recepción de RSU de la región, compactación y cubierta de los mismos y construcción de chimeneas para la salida del biogás generado, entre otras actividades. Su evolución ha sido en cuatro etapas, donde se han depositado 2 550 130 toneladas (t) de RSU. Es una zona clausurada y representa el objeto de estudio. En el sitio disponen sus RSU el municipio de Pachuca y municipios aledaños.

### Características de los RSU dispuestos en el SDF de Pachuca.

La tabla 3 muestra la composición/distribución de los RSU recolectados y la tabla 4 muestra la información característica del SDF.

**Tabla 3.** Composición de los RSU del municipio.

| Orgánico<br>(t/día)          |                        | Inorgánico (t/día) |                   |            |                |              | Otros<br>(Pañales<br>desechables, papel<br>encerado,<br>etc.) |
|------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|------------|----------------|--------------|---|
| (Sin<br>Clasificación)       | Plástico<br>o<br>(PET) | Vidrio             | Papel y<br>Cartón | Meta<br>l  | Tela-<br>Trapo | Textile<br>s |   |
| 228.9                        | 22.1                   | 13.4               | 62.1              | 12.3       | 8.2            | 12.8         | 70.2  |
| <b>Total<br/>depositados</b> |                        |                    |                   | <b>430</b> |                |              |   |

Fuente: Departamento de limpia del municipio de Pachuca, Hgo. (2014).

**Tabla 4.** Datos característicos del SDF.

| Localidad                             | Pachuca, Hidalgo |
|---------------------------------------|------------------|
| t/día (2014)                          | 430              |
| Crecimiento RSU                       | 0.022            |
| % Residuos orgánicos                  | 53.24            |
| Apertura del SDF                      | 1996             |
| Cierre 4ª celda                       | 2015             |
| Año de explotación del biogás         | 2017             |
| Área del SDF                          | 15 ha.           |
| Precipitación promedio                | 600 mm/año       |
| Contenido de metano en el biogás      | 50.0% (promedio) |
| Eficiencia del sistema de recolección | 75%              |

Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por el municipio de Pachuca, Hgo.

En la tabla 5 se presenta la información de las toneladas dispuestas en la zona de estudio entre los años de 1996 al 2015.

**Tabla 5.** RSU dispuestos por año.

| AÑO  | Residuos Sólidos Urbanos |         |                                    |                         |
|------|--------------------------|---------|------------------------------------|-------------------------|
|      | t/día                    | t/año   | toneladas<br>residuos<br>orgánicos | toneladas<br>acumuladas |
| 1996 | 137                      | 49 995  | 26 617                             | 49 995                  |
| 1997 | 273                      | 99 635  | 53 046                             | 149 630                 |
| 1998 | 278                      | 101 460 | 54 017                             | 251 090                 |
| 1999 | 282                      | 103 025 | 54 851                             | 354 115                 |
| 2000 | 287                      | 104 850 | 55 822                             | 458 965                 |
| 2001 | 296                      | 107 980 | 57 489                             | 566 945                 |
| 2002 | 304                      | 111 110 | 59 155                             | 678 055                 |
| 2003 | 362                      | 131 968 | 70 260                             | 810 023                 |
| 2004 | 365                      | 133 288 | 70 963                             | 943 311                 |
| 2005 | 369                      | 134 621 | 71 672                             | 1 077 932               |
| 2006 | 373                      | 135 967 | 72 389                             | 1 213 899               |
| 2007 | 376                      | 137 327 | 73 113                             | 1 351 226               |
| 2008 | 380                      | 138 700 | 73 844                             | 1 489 926               |
| 2009 | 388                      | 141 751 | 75 468                             | 1 631 677               |
| 2010 | 397                      | 144 870 | 77 129                             | 1 776 547               |
| 2011 | 406                      | 148 057 | 78 826                             | 1 924 604               |
| 2012 | 415                      | 151 314 | 80 560                             | 2 075 919               |
| 2013 | 424                      | 154 643 | 82 332                             | 2 230 562               |
| 2014 | 433                      | 158 045 | 84 143                             | 2 388 607               |
| 2015 | 443                      | 161 522 | 85 995                             | 2 550 130               |

Fuente: Elaboración propia con base en información proporcionada por el municipio de Pachuca, Hgo.

### Generación y recuperación de biogás

Para la estimación de la generación y recuperación de biogás se utilizó el modelo mexicano versión 2.0 (Stege & Davila, 2009), el cual está en función de:

- Cantidad de RSU dispuestos
- Composición de los residuos sólidos
- Humedad
- Profundidad del SDF
- Compactación

- Cobertura
- Entre las características que toma en cuenta están:
- Los climas de México
- Asigna composiciones para cada estado
- Usa cuatro valores de k y Lo
- Incluye ajustes que toman en cuenta las condiciones del sitio
- La disposición de RSU y eficiencia de captura es calculada con la información alimentada

La ecuación es de primer orden y se expresa de la siguiente forma:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (1)$$

donde:

$Q_{LFG}$  = Flujo de biogás

I = Incremento anual

n = Año del cálculo menos el año de la disposición inicial de los residuos

j = Incremento de tiempo en 0.1 años

$M_i$  = Masa de residuos depositados en el año i

$t_{ij}$  = Edad de la sección j de la masa  $M_i$  en el año i

K = Tasa de generación de metano

$L_0$  = Potencial de generación de metano

MCF = Factor de corrección de metano<sup>1</sup>

F=G Factor de ajuste para el fuego<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MFC depende de la profundidad y tipo de relleno sanitario. Es un ajuste de la estimación de generación de biogás que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos orgánicos, está en función de la profundidad del sitio y el tipo de relleno sanitario (Aguilar *et al.*, 2009), para esta investigación corresponde a 1.0 debido a que existe un manejo en el SDF y su profundidad es mayor a 5 m.

<sup>2</sup> F está en función de la severidad de impacto de los incendios que se generan en los SDF, debido a que las cenizas no son útiles para la generación de biogás (Stege & Davila, 2009); de acuerdo con historial del sitio, se tiene un impacto bajo que corresponde a un valor de 1/3.

## Generación de energía eléctrica

El proyecto se concibe en función de las características de producción y captación de biogás, así como de la estimación de conversión eléctrica de los generadores, donde la potencia generada es afectada por el derrateo del factor de planta de los motogeneradores (5%) y el factor de mantenimiento (5%).

## Arreglo técnico para la extracción de biogás y generación de energía

La planeación y diseño de las redes de captación y conducción del biogás toma en cuenta el área y radio de influencia de los pozos, estipulando de 2.25 a 2.5 veces la profundidad del pozo y arreglos triangulados (Semarnat, 2009), así como la red de conducción, control de extracción, trampa de lixiviados, sistema de soplado y accesorios, sistema de remoción de condensados y antorcha de seguridad.

## Bonos de Carbono (BC)

Un beneficio de la generación de energía a partir de RSU es la comercialización de los bonos de carbono a través de certificados en los diferentes mercados de venta, que se otorgan por la reducción de las emisiones de GEI, que en sus inicios estuvo estipulado en la Ley General de Cambio Climático del Protocolo de Kyoto (Aguilar *et al.*, 2009) y que actualmente se maneja por mercados voluntarios (Bascón, 2012; Investing, 2016; Ruiz-Tagle, 2013).

Para calcular los ingresos por BC se obtuvieron las reducciones equivalentes de dióxido de carbono (RE) para el metano, tanto del gas que se usa como combustible para generar energía eléctrica, como el excedente que se destina al quemador. La ecuación 2 muestra el procedimiento:

$$RE_{CO_2} = (MD_E + MD_Q) * CER * TC \quad (2)$$

donde:

|                     |  |
|---------------------|--|
| RE <sub>CO2</sub> = | Reducción de emisiones de metano, en tCO2e           |
| MD <sub>E</sub> =   | Metano destruido en eléctrico, en tCO2e              |
| MD <sub>Q</sub> =   | Metano destruido en quemador, en tCO2e               |
| CER=                | Precio de los certificados de reducción de emisiones |
| TC=                 | Tipo de cambio                                       |

## Evaluación financiera y desarrollo de escenarios

Con la evaluación financiera se determina la rentabilidad del proyecto, la cual se estima en función de los indicadores siguientes: valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y tiempo de recuperación de la inversión (TRI), donde el escenario base es sin certificado de carbono. Para sensibilizar la factibilidad del proyecto, se plantearon escenarios, donde se varió desde -20% a +20% los parámetros de: inversión (I), precio de la energía eléctrica (PEE), tasa de descuento (TD) y precio de los certificados de carbono (PCC).

$$VPN = -i + \sum_{t=0}^n \left[ \frac{FEt}{(1+r)^t} \right]$$

donde:

$i$  = Inversión inicial

$FE_t$  = Flujo de caja en el año  $t$

$t$  = Período de tiempo

$n$  = Duración de la vida del proyecto

$r$  = Tasa de descuento

## Gestión municipal

Las principales barreras y problemas que impiden el desarrollo de proyectos de biogás están asociadas con las estructuras político-administrativas actuales y los tiempos de las administraciones municipales.

De cualquier forma, existe un interés creciente en el país por atender el problema de la disposición final de residuos y, al mismo tiempo, generar recursos a través de proyectos de aprovechamiento del biogás.

## Marco social

Es necesario señalar que la imposición vertical y autoritaria de proyectos energéticos, turísticos, carreteros, hidrológicos o de rellenos sanitarios en el país están abriendo un abanico de conflictos socioambientales (con costos en vidas humanas), porque muchas veces las poblaciones locales (ejidatarios, comuneros y pueblos indígenas) no son consultados o tomados en cuenta por las élites políticas locales y las empresas promotoras de dichos proyectos. En este caso, a menudo la construcción y operación de un SDF también encuentra oposición por parte de la población, generalmente ocasionada por falta de conocimiento o por desconfianza en las administraciones locales. Por ello, es importante sensibilizar a la población y actores principales de los beneficios esperados, tanto a nivel local como general, entre los que se encuentran:

- Incremento en las condiciones de salubridad
- Concienciación entre los vecinos de la importancia de resolver problemas de contaminación derivados de estos sitios
- Mejora en la imagen urbana
- Desarrollo económico

## Proceso de sensibilización y voluntad del municipio

En este punto es importante sensibilizar, es decir, llevar a cabo reuniones, exclusivamente para informar, documentar y explicar de forma minuciosa a las autoridades municipales la relevancia de llevar a cabo proyectos de este tipo, por la importancia en cuanto a mitigación de impactos ambientales, beneficios sociales, beneficios económicos y de la envergadura política que se puede manejar por el impacto en la sociedad.

## Marco regulatorio

Es importante analizar la legislación federal, estatal y municipal, para conocer las regulaciones y restricciones para llevar a cabo el proyecto.

- La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su Artículo 115 enumera las responsabilidades y atribuciones de los municipios y dispone que estos sean los encargados de ofrecer los servicios de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de la basura urbana. Sin embargo, el mismo artículo señala que los municipios deben cumplir con las normas y regulaciones en la materia emitidas por la federación. El problema es que los reglamentos y operación son diferentes en cada municipio, donde no existe uniformidad, y las capacidades económicas y administrativas son distintas.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Dependencia federal que tiene entre sus atribuciones definir la ubicación de SDF, aprobar su construcción o ampliación y aplicar sanciones a los ayuntamientos que no cumplan con las normas ambientales. En este caso, corresponde a la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, que tiene como objeto el garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado, propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; y prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación (DOF, 2018).
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa). Interviene para definir la ubicación de SDF, verifica el cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2015), recibe los proyectos para la construcción de RS y tiene autoridad para aplicar sanciones en el incumplimiento a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2015).
- Consejo Estatal de Ecología (Coede). Entre sus facultades está la identificación, selección y aprobación de los SDF, la aprobación para convertir tiraderos municipales en RS y vigilar el cumplimiento de la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2015).
- Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo. Regula las conductas que ocasionan o pueden ocasionar daños al ambiente dentro del territorio estatal, así como las acciones tendientes a la preservación, restauración y mejoramiento del equilibrio ecológico.

## Medio ambiente

Las emisiones de biogás por parte de los SDF son una fuente importante de contaminantes que afectan a la atmósfera. Con el desarrollo del proyecto de aprovechamiento del biogás del SDF de Pachuca se puede tener un beneficio ambiental al reducir estas emisiones contaminantes, además de disminuir malos olores y reducir la fauna nociva (plagas de moscas, mosquitos, roedores, cucarachas, etc.). Adicionalmente, se contribuye a la preservación de recursos no renovables (combustibles fósiles y agua).

## Marco internacional

La Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático que se adoptó durante *La Cumbre de la Tierra*, en Río de Janeiro en 1992, vigente a partir del 21 de marzo de 1994, tiene como objetivo estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera, a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático (Ponce, Cantú, y Puente, 2013). Con respecto a los residuos sólidos, la Agenda 21 en su Capítulo 21, hace mención a la gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos, donde menciona que se debe ir más allá de la simple eliminación o el aprovechamiento por métodos seguros de

los desechos producidos y procurar resolver la causa fundamental del problema intentando cambiar las pautas no sostenibles de producción y consumo. Actualmente, la variabilidad de los precios de los energéticos ha repercutido en la valoración de este tipo de proyectos, lo cual es una oportunidad en alternativas de generación de energía y contribución a la protección del medio ambiente.

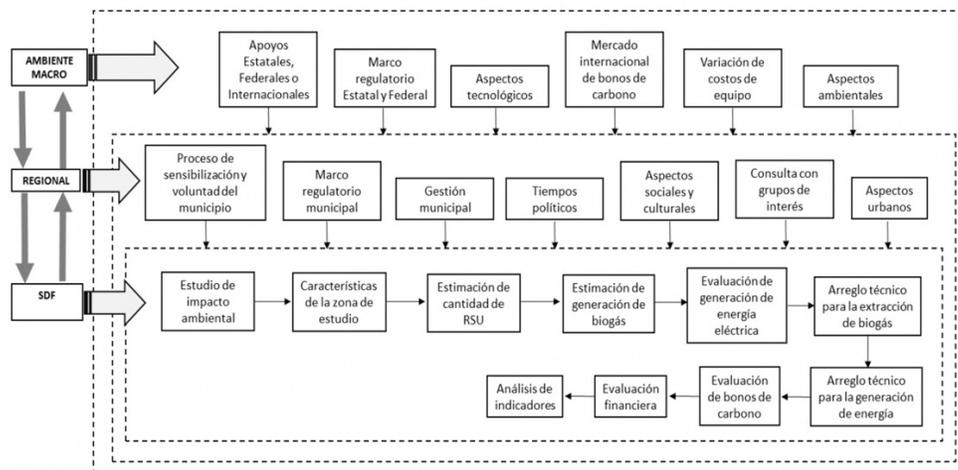
### Recursos externos

Es necesario considerar recursos externos de inversión, ya que los recursos gubernamentales son limitados; sin embargo, es el mismo marco regulatorio quien restringe este tipo de inversión.

### Metodología propuesta

Para abordar este estudio de forma integral, se desarrolló una metodología con un enfoque sistémico que parte de la conceptualización de Concha, Cerda & Zappi (2012), Gigch (2006) y Johansen (1996), quienes plantean que la sociedad está organizada alrededor de sistemas complejos, en los cuales el hombre trata de proporcionar orden, partiendo de que es un método de aproximación al entendimiento y solución de problemas de la sociedad, donde la comprensión de las múltiples interacciones de sus componentes es una condición para explicar y predecir fenómenos bajo estudio y, sobre todo, acercarse a una visión más real en situaciones prácticas (Checkland, 1993), además de lo expuesto por Pascual *et al.* (2011), quienes analizan una metodología para la estimación del potencial de biogás, donde toman en cuenta el potencial total, potencial accesible, potencial disponible y potencial energético.

La metodología se estructuró en tres niveles, considerando características de aspectos técnicos del SDF para la generación de energía, factores a nivel municipal y externalidades macro que pueden afectar su factibilidad (figura 1).



**Figura 1.** Metodología.  
Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

### Nivel interno (SDF)

#### Generación y recuperación de biogás

La figura 2 muestra la generación y recuperación de biogás de acuerdo con modelo mexicano versión 2. El proyecto se estimó con una vida útil de 20 años, iniciando en el año 2017.

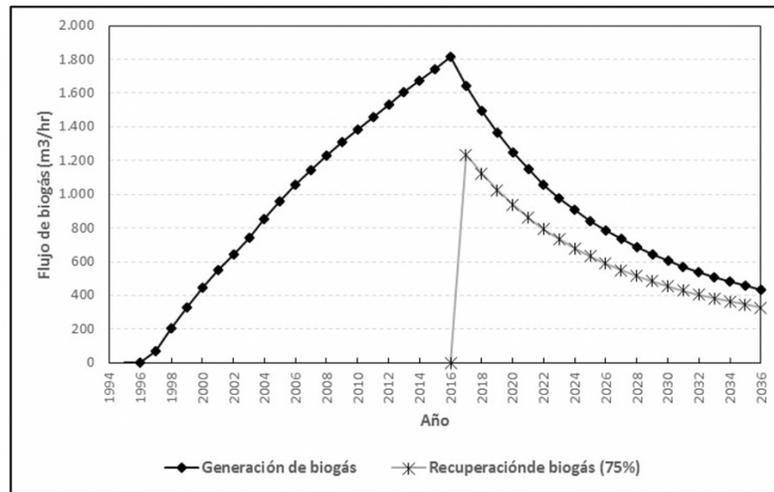


Figura 2. Generación y recuperación de biogás del SDF de Pachuca.  
Fuente: Elaboración propia.

#### Generación de energía eléctrica

De acuerdo con las estimaciones del biogás captado, se calculó la potencia disponible por año, resultando dos generadores con potencia conjunta de 1.6 MW/h, teniendo un derrateo por factor de planta de los motogeneradores del 5% y mantenimiento del 5%, lo cual se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Potencial de energía eléctrica del SDF.

|      | Biogás generado | Captación de metano | Potencia disponible Del metano | Capacidad instalada | Potencia disponible del generador | Potencia generada | Energía generada |
|------|-----------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------|
| Año  | m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup>      | MW/h                           | MW/h                | MW/h                              | MW/h              | MW/año           |
| 2017 | 15 445 078      | 5 791 904           | 2.04                           | 1.60                | 1.60                              | 1.44              | 12 649.4         |
| 2018 | 14 053 416      | 5 270 031           | 1.86                           | 1.60                | 1.60                              | 1.44              | 12 649.4         |
| 2019 | 12 828 382      | 4 810 643           | 1.69                           | 1.60                | 1.60                              | 1.44              | 12 649.4         |
| 2020 | 11 747 421      | 4 405 283           | 1.55                           | 1.60                | 1.55                              | 1.40              | 12 270.9         |
| 2021 | 10 791 187      | 4 046 695           | 1.43                           | 1.60                | 1.43                              | 1.29              | 11 272.0         |
| 2022 | 9 943 073       | 3 728 652           | 1.31                           | 1.60                | 1.31                              | 1.19              | 10 386.1         |
| 2023 | 9 188 817       | 3 445 806           | 1.21                           | 1.60                | 1.21                              | 1.10              | 9598.3           |
| 2024 | 8 516 163       | 3 193 561           | 1.13                           | 1.60                | 1.13                              | 1.02              | 8895.6           |
| 2025 | 7 914 567       | 2 967 963           | 1.05                           | 1.60                | 1.05                              | 0.94              | 8267.2           |
| 2026 | 7 374 957       | 2 765 609           | 0.97                           | 1.60                | 0.97                              | 0.88              | 7703.6           |

|      |           |           |      |      |      |      |        |
|------|-----------|-----------|------|------|------|------|--------|
| 2027 | 6 889 514 | 2 583 568 | 0.91 | 1.08 | 0.91 | 0.82 | 7196.5 |
| 2028 | 6 451 499 | 2 419 312 | 0.85 | 1.08 | 0.85 | 0.77 | 6739.0 |
| 2029 | 6 055 093 | 2 270 660 | 0.80 | 1.08 | 0.80 | 0.72 | 6324.9 |
| 2030 | 5 695 269 | 2 135 726 | 0.75 | 1.08 | 0.75 | 0.68 | 5949.1 |
| 2031 | 5 367 680 | 2 012 880 | 0.71 | 1.08 | 0.71 | 0.64 | 5606.9 |
| 2032 | 5 068 558 | 1 900 709 | 0.67 | 1.08 | 0.67 | 0.60 | 5294.4 |
| 2033 | 4 794 638 | 1 797 989 | 0.63 | 1.08 | 0.63 | 0.57 | 5008.3 |
| 2034 | 4 543 084 | 1 703 656 | 0.60 | 1.08 | 0.60 | 0.54 | 4745.5 |
| 2035 | 4 311 429 | 1 616 786 | 0.57 | 1.08 | 0.57 | 0.51 | 4503.5 |
| 2036 | 4 097 525 | 1 536 572 | 0.54 | 1.08 | 0.54 | 0.49 | 4280.1 |

Fuente: Elaboración propia.

### Bonos de Carbono (BC)

Para calcular los ingresos por BC se obtuvieron las Reducciones Equivalentes (RE) de dióxido de carbono para el metano, tanto del gas que se usa como combustible para generar energía eléctrica como del excedente que se destina al quemador.

Se considera un precio promedio de Certificado de Reducción de Emisiones (CER) de 4.47 euros por tonelada equivalente de CO<sub>2</sub> de acuerdo al análisis desarrollado por Investing (2016) y un tipo de cambio 20.57 pesos/euro (junio de 2016), aunque se observa que las variaciones a través del tiempo son significativas.

### Arreglo técnico para la extracción de biogás y generación de energía

El arreglo configurado mostrado en la figura 3, comprende 46 pozos, la red de conducción, control de extracción, trampa de lixiviados, sistema de soplado y accesorios, sistema de remoción de condensados y antorcha de seguridad.



**Figura 3.** Distribución de pozos de captación en el SDF.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la viabilidad financiera del proyecto, se consideraron los aspectos de inversiones y costos iniciales mostrados en la tabla 7 y 8.

**Tabla 7.** Inversiones y costos iniciales.

| Concepto               | Pesos             |
|------------------------|-------------------|
| Manejo de biogás       | 14 409 907        |
| Generación de energía  | 26 794 200        |
| Costos complementarios | 6 650 000         |
| Contingencias          | 4 275 411         |
| <b>TOTAL</b>           | <b>52 129 518</b> |

Fuente: Elaboración propia.

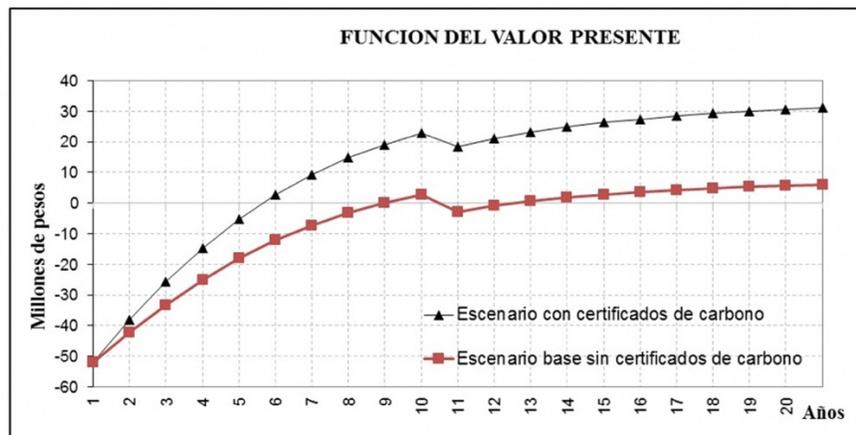
**Tabla 8.** Costos de operación anual inicial del proyecto.

| Concepto                  | Pesos            |
|---------------------------|------------------|
| Operación y mantenimiento | 4 222 179        |
| Personal                  | 2 361 600        |
| Administrativos           | 122 000          |
| Validación y verificación | 642 000          |
| Porteo                    | 1 770 921        |
| Contingencias             | 599 310          |
| <b>TOTAL</b>              | <b>9 718 010</b> |

Fuente: Elaboración propia.

### Análisis financiero

Se utilizó la fórmula del VPN, con una TD del 10% de acuerdo a lo estipulado por el BID (Campos, Serebrisky & Suárez-Alemán, 2016), un precio de referencia de la energía de 2.315 pesos/kwh en tarifa 5A tensión media (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2016), con un descuento de 20% para hacer atractiva su venta (1.852 pesos/kWh), un factor de planta de 90% que va de acuerdo con lo que proponen Vera et al. (2015) y venta de certificados de carbono.. La figura 4 muestra los resultados del comportamiento del VPN a través de los años y la tabla 9 los resultados de la evaluación financiera.



**Figura 4.** Comportamiento del VPN.

Fuente: Elaboración propia.

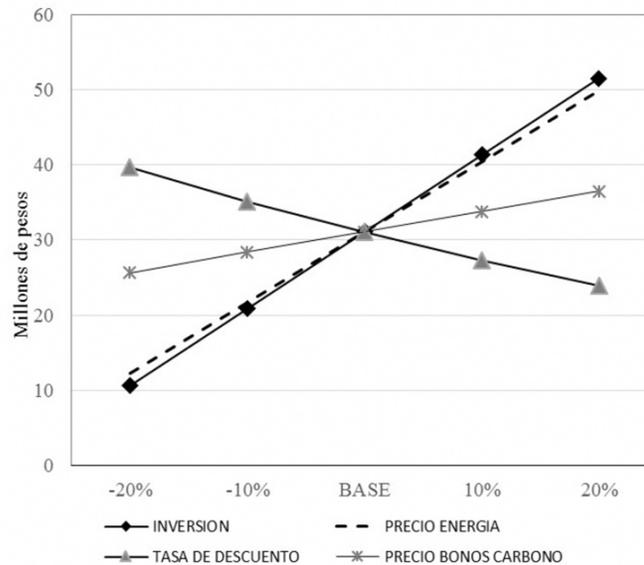
**Tabla 9.** Resultados de la evaluación financiera.

| Indicador       | Escenario sin venta de certificados de carbono | Sin ganancias ni pérdidas | Escenario con venta de certificados de carbono |
|-----------------|--|---------------------------|--|
| VPN (millones)  | 6.1  | 0                         | 31.1   |
| TIR (%)         | 12.6   | 10                        | 22.4   |
| TRI (años)      | 12.6   | 20                        | 4.6  |
| PEE (pesos/kWh) | 1.852  | 1.2926                    | 1.852  |

Fuente: Elaboración propia.

### Análisis de sensibilidad

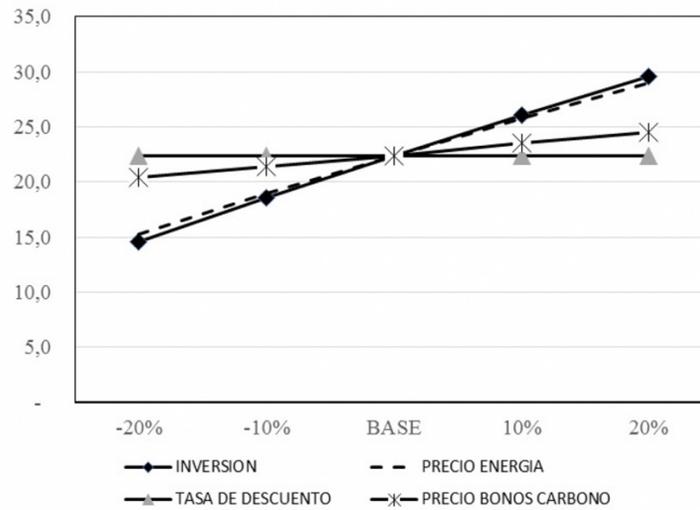
Se realizó con la variación de: TD, I, PEE, y PCC en -20%, -10%, 10% y 20% con respecto al escenario base (con venta de certificados de carbono), como se muestra en figura 5, 6 y 7, lo cual permitió visualizar el efecto en los resultados de los indicadores financieros del proyecto.



**Figura 5.** Sensibilidad del VPN.

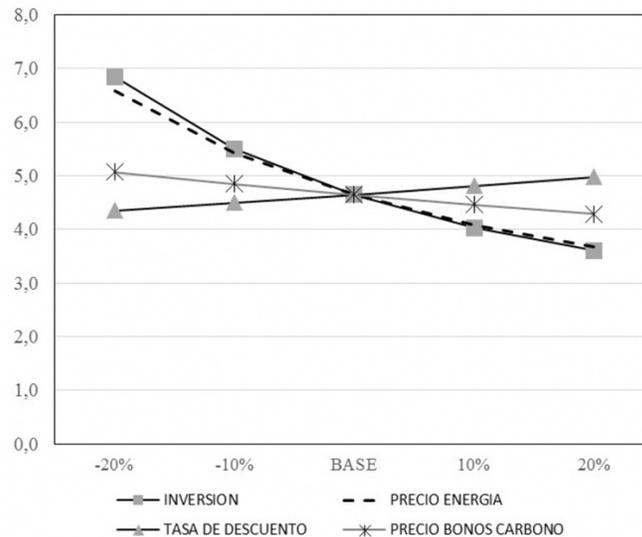
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 5, se observa que el precio de la energía es la variable que más afecta al VPN, debido a que tiene un mayor rango monetario, si se le compara con el precio de los CER y que va ligado con la producción de energía eléctrica.



**Figura 6.** Sensibilidad de la TIR.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se observa que el precio de venta de la energía, como en la gráfica anterior, es la variable de mayor impacto; ya que está ligada a la producción de biogás y energía eléctrica.



**Figura 7.** Sensibilidad del TRI.  
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 7 se observa que cuando el precio de venta de la energía disminuye, el tiempo de recuperación de la inversión aumenta y, como la valoración se sustenta en la venta de la energía eléctrica, es la variable que más afecta. La variable del precio de venta de la energía es la de mayor sensibilidad y la variable del precio de los CER es la de menor sensibilidad.

## Nivel externo (regional y macro)

### Análisis de impactos para la viabilidad

Se desarrolló la tabla 10 para establecer el estado actual del SDF en función de las condiciones para la explotación del proyecto, observándose que tiene una tendencia favorable, detectándose como puntos críticos el factor político y social. A pesar de que en la factibilidad técnica esta en el estatus 1, el avance de esta variable depende de cuestiones de sensibilización, tiempos políticos y gestión municipal.

**Tabla 10.** Valoración del estado actual del proyecto.

| Variable                          | Estatus   |  |  |   |
|-----------------------------------|---|--|--|---|
|                                   | 1   | 2  | 3  | 4   |
| Factibilidad técnica              | Clausura del sitio de disposición final.                | Extracción y manejo de biogás.   | Uso de metano como combustible y quema de excedentes de biogás.  | Uso de metano para generación de energía eléctrica.   |
| Factibilidad financiera           | Alto costo y sin recuperación.                          | VPN tiende a cero.   | Análisis con bonos de carbono ayuda a que el proyecto sea factible.  | Bonos de carbono, venta de energía y apoyo gubernamental hacen factible el proyecto, además existen inversionistas.   |
| Factibilidad política             | No hay interés.   | Tiempos políticos a mitad o finalización del período de gestión.   | Inicio de período de administración y sensibilización autoridades ante temas ambientales.                    | Proyecto desarrollado desde una administración anterior e inicio de administración y sensibilización autoridades de temas ambientales.  |
| Factibilidad social               | No está sensibilizada la población vecina del lugar.    | La población percibe lo que es un proyecto de biogás, pero no tiene idea de los beneficios.  | La población conoce lo que es un proyecto de biogás y conoce los beneficios.                                 | Población y líderes están sensibilizados y conocen los beneficios de un proyecto de biogás.   |
| Factibilidad ambiental            | Es un tiradero.   | Es un sitio controlado.  | Es un relleno sanitario.   | Es un sitio donde se recupera el biogás.  |
| Factibilidad en marco regulatorio | No existen regulaciones para la explotación del biogás. | Existen regulaciones a nivel federal, pero a nivel estatal y municipal no han alineado las iniciativas con proyectos de energías alternas. | Existe concordancia entre el marco regulatorio federal, estatal y municipal además de dependencias de apoyo. | Además del nivel anterior, puede vender el gas o energía eléctrica generada, puede participar la iniciativa privada y ya se ha desarrollado proyecto donde se han resuelto las controversias. |
| Proyecto ejecutivo                | Se tiene la idea.                                       | Se cuenta con un proyecto de clausura.   | Se tiene un proyecto de captación de biogás.   | Se tiene un proyecto de aprovechamiento de biogás para generar energía eléctrica.   |

Fuente: Elaboración propia.

El proyecto también se valoró mediante una matriz de impactos que oscilan entre 0 y 3, realizado con la consulta a expertos en la materia, en donde 0 significa que no es viable y 3 que es aceptable. Se tomaron como base las condiciones propuestas para el sitio, las oportunidades para la venta de certificados de carbono, el precio de venta de la energía eléctrica y cuestiones exógenas propias de la región, donde se

obtuvieron en su mayoría resultados de 2 y 3; lo cual se considera aceptable para la viabilidad del proyecto (tabla 11).

**Tabla 11.** Matriz de viabilidad del proyecto.

| Concepto  | Viabilidad |                         |       |          |        |                      |           |
|---|------------|-------------------------|-------|----------|--------|----------------------|-----------|
|   | Técnica    | Económica<br>Financiera | Legal | Política | Social | Recursos<br>foráneos | Ambiental |
| Clausura del SDF  | 2          | 2                       | 2     | 2        | 3      | 1                    | 3         |
| Extracción y manejo de biogás   | 2          | 2                       | 2     | 1        | 3      | 2                    | 3         |
| Generación de energía eléctrica   | 3          | 3                       | 2     | 3        | 2      | 3                    | 3         |
| Venta de CERs por quemado y generación de energía en mercado de carbono | 2          | 2                       | 3     | 2        | 2      | 3                    | 3         |
| Venta de energía generada   | 3          | 2                       | 3     | 3        | 2      | 3                    | 3         |

| Criterios de impacto |   |
|----------------------|---|
| NADA                 | 0 |
| MÍNIMO               | 1 |
| REGULAR              | 2 |
| ACEPTABLE            | 3 |

Fuente: Elaboración propia.

## Discusión

ProMéxico (Sener, 2016) y Arvizu *et al.* 2006 destacan la importancia de mitigar la contaminación de biogás (metano) al medio ambiente propiciada por los SDF y porque se puede aprovechar para generar energía eléctrica. Esto contribuye a la sustitución de energéticos fósiles, que es la esencia de estos proyectos, pero es importante destacar que para que puedan ser viables es necesario el análisis del ambiente donde están inmersos. Así, los tiempos de gestión municipal, el impacto ante la sociedad y la factibilidad financiera tienen gran influencia, lo cual concuerda con las variables analizadas en la investigación.

Es de suma importancia aprovechar los mercados de bonos de carbono para obtener recursos y mejorar la factibilidad de los proyectos de biogás a partir de SDF (López *et al.*, 2016); en este caso, con bonos de carbono, el VPN pasa de 6.1 a 31.1 millones y el TRI de 12.6 a 4.6 años, siendo su impacto muy significativo.

Si comparamos el TRI y el VPN sin el beneficio de los certificados de carbono, con el estudio realizado en 21 regiones de México en proyectos con vida útil de 20 años, semejante al estudio presentado por Vera-Romero *et al.* (2017), donde presentan resultados con un TRI entre 10 y 12 años y un VPN de 5.3 millones, encontramos que los resultados del proyecto son similares. En nuestro estudio, el TRI es muy similar (12.6 años), mientras que el VPN tiene un margen de diferencia de 15% mayor. Se encontró que uno

de los riesgos es la variación de los precios de la energía eléctrica y, en el caso de los certificados de carbono, su reducción en precio, que puede afectar los tres indicadores considerados y ser un punto de inflexión en la toma de decisiones.

Las investigaciones desarrolladas por Aguilar *et al.* (2009), Pascual *et al.* (2011), Stege & Dávila (2009) y Vera *et al.* (2017) aportan conocimiento de como analizar y evaluar un proyecto de este tipo a nivel técnico-financiero, pero es importante saber como insertarlo y estudiar la factibilidad en su región, porque existen variables como la gestión municipal, cuestiones políticas, conocimiento de este tipo de proyectos por las autoridades, sensibilidad para su inserción en la región (manejo adecuado de la información en cuanto a beneficios económicos y ambientales), afectaciones y mitigación por los impactos a la población y al medio donde viven, entendimiento y aplicación del marco regulatorio, entre otras variables, las cuales pueden llevar al éxito o fracaso.

A nivel político es difícil de valorar, pero se ha observado en otras entidades que cuando las administraciones municipales van iniciando su gestión, es más probable que se pueda tener el apoyo a este tipo de proyectos, ya que, si estos proyectos se inician después de la mitad de su período de administración, ya no son tomados en cuenta por considerarse que su puesta en marcha va más allá del período del ayuntamiento en funciones. También, es importante involucrar a personas que tengan experiencia en el desarrollo de este tipo de proyectos y la obtención de recursos, con la habilidad de tomar en cuenta a los gobernantes en los puntos trascendentes del proceso.

Para la pertinencia del proyecto se desarrolló una matriz donde se analizan las variables que impactan del medio y que van ligadas con la gestión municipal (tabla 12).

**Tabla 12.** Pertinencia para hacer realidad el proyecto de aprovechamiento de biogás.

| Concepto                            | Legal  | Política   | Social  | Recursos foráneos   |
|-------------------------------------|--|--|---|---|
| Gobierno municipal                  | Periodos de tres a cuatro años, favorecen la factibilidad si se inicia a la par el proyecto.   | Los cambios de gestión municipal o partidos políticos hacen que no haya continuidad en proyectos anteriores.     | Normalmente apoyan proyectos que tienen impacto, son visibles y de corto plazo.   | Baja probabilidad de inversión al conocer que los periodos de gestión municipal son diferentes a los periodos del proyecto.                       |
| Gestión del proyecto                | El proceso es complejo por las diferentes instancias que tienen que emitir una opinión sobre el proyecto, aunado a que no tienen gente especialista. | La gestión depende del interés de los actores políticos, quienes aceptan o rechazan la realización del proyecto. | El interés de la sociedad dependerá de la sensibilización desarrollada.   | La factibilidad del proyecto, disposición de autoridades y sociedad serán factores determinantes para su inclusión.                               |
| Tiempo para las etapas del proyecto | Se tiene que apegar a tiempos establecidos por la normatividad vigente, así como estar al pendiente de posibles cambios.                             | La realización del proyecto debe apegarse a los tiempos clave y prioridades de la administración municipal.      | Las etapas de sensibilización deberán ser oportunas a las necesidades de la sociedad y establecer acuerdos con los representantes de comunidades. | La coordinación entre el municipio, dependencias gubernamentales, inversionistas y ejecutores del proyecto serán clave para su buena realización. |

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de factibilidad del proyecto se detectó que los puntos focales que requieren mayor atención, debido al riesgo que representan, son:

- Comprensión de la problemática integral de los RSU por parte de la clase política.
- Una visión integral y sistémica en los planes municipales.
- Continuidad en los proyectos por las diferentes gestiones de gobiernos municipales.
- Proyectos y gestores que permitan llevar a cabo su desarrollo.
- Aplicación de las leyes y normatividad respectiva de protección al medio ambiente en materia de emisiones.
- Apoyo y asignación de recursos financieros.
- Capacidad técnica y de negociación.

Los resultados obtenidos con las variables consideradas concuerdan con la investigación documental analizada y la consulta a expertos.

## Conclusiones

Para reducir algún tipo de riesgo en proyectos de biogás a partir de RSU es importante considerar un análisis sistémico, donde se estipulen los recursos y necesidades en el ciclo de vida del proyecto y se identifiquen las fuentes potenciales de riesgos como parte de la evaluación económica-financiera del proyecto considerando un entorno dinámico. La viabilidad técnico y financiera, enmarcadas en el primer nivel (interno) de la metodología, permiten su utilización con variables y factores que pueden llegar a ser complejos; sin embargo, en los siguientes niveles (regional y macro), los factores a considerar se vuelven más complejos tanto para medir como para predecir.

Con las condiciones expuestas en esta investigación, el proyecto a nivel técnico-financiero es rentable, ya que se obtiene un VPN positivo y el tiempo de recuperación de la inversión es en el mediano plazo, siendo la variación en el precio de la energía eléctrica la que mayor impacta en los indicadores financieros.

A nivel externo, la variable más preocupante es la duración del período de la administración municipal debido a los distintos plazos de las fases del proyecto donde es importante tomar en cuenta los plazos para la sensibilización del proyecto a la administración pública, asesoramiento técnico, elaboración de términos de referencia, licitaciones, desarrollo del proyecto ejecutivo, negociaciones, análisis del marco regulatorio, acceso a CER, supervisión, gestión para acceso a recursos, entre otros, lo cual hace que la administración pública lo conciba como un proceso complejo, viéndose este panorama reflejado en los pocos proyectos desarrollados en México.

## Agradecimientos

Oscar Montaño Arango, Héctor Rivera Gómez y Marco Antonio Montufar Benítez agradecen al programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Cyted) por apoyar la Red temática BigDSS-Agro.

## Referencias

- Aguilar, Q., Armijo, C., & Taboada, P. (2009). El potencial energético de los residuos sólidos municipales. *Revista Ingeniería, Investigación y tecnología*, 13(1), 59-62.
- Arvizu, J. L., Huacuz, J. M., & Saldaña, J. L. (2006). Evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios. *Revista AIDIS de ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, 1(1), 1-14.
- Bascón, D. (2012). *Estudio de mercado de Bonos de Carbono para el mercado alemán*. Berlín, Alemania: ProChile / Información Comercial.
- Campos, J., Serebrisky, T., & Suárez-Alemán, A. (2016). Tasa de descuento social y evaluación de proyectos: Algunas reflexiones prácticas para América Latina y el Caribe. *IDB Monografía 413*.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2016). *Tarifas generales en alta tensión. Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2016-2017)*. Recuperado el 16 de junio de 2016 de: [http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas\\_industria.asp](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_industria.asp)
- Checkland, P. (1993). *Pensamiento de sistemas, práctica de sistemas* (1ª Ed.). México: Limusa.
- Concha, M., Cerda, C., & Zappi, M. (2012). Enfoque sistémico para el diseño de sistemas energéticos acuícolas resilientes: Discusión aplicada al caso de una empresa de cultivos. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 40(3), 813-821.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (04 de agosto de 2015). Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (19 de enero de 2018). *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos*.
- Gigch, J. (2006). *Teoría General de Sistemas* (1ª Ed.). México: Editorial Trillas.
- Gutierrez, G., Moncada, M., Meza, A., Félix, J., Balderas, J., & Gortáres P. (2011). Biogás: Una alternativa ecológica para la producción de energía. *Ideas CONCYTEG*, 7(85), 881-994.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., & Kennedy, C. (2013). Waste production must peak this century. *Nature*, 502, 615-617.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). *Estadística, México. Residuos Sólidos Urbanos. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales*. Recuperado el 20 de abril de 2016 de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/censosgobierno/cng2011gmd/default.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Estadística, México. Encuesta intercensal 2015*. Recuperado el 28 de abril de 2016 de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/>
- Investing (2016). *Datos históricos. Futuros emisiones de carbono*. *Fusion Media Ltd*. Recuperado el 28 de abril de 2016 de <http://mx.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>
- Johansen, B. (1996). *Introducción a la teoría general de sistemas* (1ª Ed.). México: Limusa.
- Johari, A., Ahmed, S., Hashim, H., Alkali, H., & Ramli, M. (2012). Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2907-2912. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.005>

- López, V., Romero, J., Toache, G., & García, S. (2016). Bonos de carbono: Financiación del medioambiente en México. *Estudios Sociales*, 25(47), 191-215.
- Pascual, A., Ruiz, B., Flotats, X., & Fernández, B. (2011). Situación y potencial de generación de biogás. En J. Margarit (Ed.), *Estudios Técnicos PER 2011-2020*. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía (IDAE).
- Rawat, M., & Ramanathan, A. L. (2011). Assessment of methane flux from municipal solid waste (MSW) landfill areas of Delhi, India. *Journal of Environmental Protection*, 2(4), 399-407. doi: <https://doi.org/10.4236/jep.2011.24045>
- Ruiz, M. (Ed.). (2013). *Estrategias de desarrollo bajo en carbono en megaciudades de América Latina*. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas-CEPAL.
- Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). (1996). *Manual para la operación de Rellenos Sanitarios*. México: SEDESOL.
- Secretaría de Energía (Sener). (2012). *Prospectivas de energía renovable 2012-2026*.
- Secretaría de Energía (Sener). (2015). *Tercer Informe de Labores 2014-2015*.
- Secretaría de Energía (Sener). (2016). *Energías renovables. Diagnóstico sectorial*. ProMéxico.
- Ponce, Y., Cantú, P. & Puente, J. (2013). La gestión ambiental del cambio climático, *CULCyT*, 10 (51), 14-41.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2009). *Manual de especificaciones técnicas para la construcción de rellenos sanitarios para residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos de manejo especial (RME). Manual de Especificaciones Técnicas*.
- Stege, G., & Davila, J. (2009). *Modelo mexicano de biogás - versión 2. Manual del Usuario*. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency (EPA).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2004). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Terraza, H., Bartone, C., & Grajales, F. (2005). *Mejorando las Prácticas en la Gestión de RSU por medio del Financiamiento con Carbono. LFG Project Expo*. Montevideo, Uruguay: The World Bank.
- Tron, F. (2010). La recogida de basura en mega-ciudades: En el marco de la sostenibilidad. *Revista INVI*, 25(70), 181-222. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582010000300006>
- Varnero, M. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile, Chile: Organización de las Naciones Unidas (ONU).
- Vera, I., Estrada, M., González, C., Tejeda, M., López, A., & Ortiz, A. (2017). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 307-320.
- Vera, I., Estrada, M., Martínez, J., & Ortiz, J. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 471-478.
- World Bank (WB). (2004). *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean*. Ontario, Canada: Banco Mundial.