

**Universidad Andina Simón Bolívar**

**Sede Ecuador**

**Área de Ambiente y Sustentabilidad**

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

## **Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable**

### **Análisis del potencial de la ciudad de Quito**

Karla Gabriela Espinosa Mantilla

Tutor: Eduardo Esteban Noboa Campana

Quito, 2021

Trabajo almacenado en el Repositorio Institucional UASB-DIGITAL con licencia Creative Commons 4.0 Internacional

  	<b>Reconocimiento de créditos de la obra</b> No comercial Sin obras derivadas	 <b>creative commons</b>
---	---	---

Para usar esta obra, deben respetarse los términos de esta licencia



## **Cláusula de cesión de derecho de publicación**

Yo, Karla Gabriela Espinosa Mantilla, autora de la tesis intitulada “Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable: Análisis del potencial de la ciudad de Quito”, mediante el presente documento de constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

23 de marzo de 2021

Firma: \_\_\_\_\_



## Resumen

El biogás, producto de la digestión anaerobia, es un recurso energético renovable cuyo potencial no ha sido totalmente aprovechado aún. Además de contribuir a la mitigación y adaptación del cambio climático, la energía con biogás está ligada al manejo sostenible de biomasa residual. Se considera que el biogás es una alternativa de energética apropiada para la ciudad de Quito, debido a su composición de residuos que tiene una proporción mayoritaria de orgánicos. Para determinar la posibilidad de utilizar este recurso en Quito, esta investigación analizó seis sitios representativos que usan biogás para generar energía: Alemania, Japón, Estados Unidos, Bolivia, Colombia y México. La revisión de cada caso permitió establecer las fortalezas y debilidades que existen para el aprovechamiento energético del biogás. También se cuantificó el biogás que produce su fuente más importante: el relleno sanitario El Inga, y se realizó una comparación de los casos estudiados con la realidad de la ciudad. Este análisis principal tomó en cuenta solo las fortalezas más comunes y las debilidades menos comunes halladas en los casos, pues se las consideró como aspectos necesarios y retos superables. Se encontró que el uso de biogás como recurso energético en la ciudad de Quito se ve obstaculizado por las limitaciones existentes. Los resultados del cálculo, obtenidos con el modelo LandGEM, mostraron que El Inga seguiría produciendo una cantidad significativa de biogás hasta 120 años después de su cierre, pero la ciudad no está lista para poder aprovechar energéticamente ese recurso. La situación actual de los proyectos de biogás en Quito indica que no hay disponibilidad ni experiencia con la tecnología. Y las perspectivas futuras sugieren que las autoridades se centrarán en otros temas, como la crisis actual del sector Desperdicios. Además, no existe un marco legal para apoyar el biogás ni infraestructuras que se puedan adaptar para hacer digestión anaerobia, como plantas de tratamiento de agua residual, en Quito. Si la ciudad tomara la decisión de aprovechar energéticamente el biogás en un futuro, se sugiere que busque mejorar sus alianzas con el sector privado e implemente la producción de biogás dentro de un plan de manejo sostenible de residuos.

Palabras clave: digestión anaerobia, implementación de tecnología, electricidad, sostenibilidad, relleno sanitario El Inga, modelo LandGEM



A mi mamá Leyla Mantilla Aslalema, por brindarme su amor y comprensión cuando me vi envuelta en una situación familiar difícil y al mismo tiempo apoyarme desde que empecé a escribir esta tesis.

A mi tía Mireya Mantilla Aslalema, quien me dio el impulso necesario para iniciar este ciclo de estudio.

A los amigos que conocí mientras estudiaba la maestría, por los buenos momentos que compartimos y las valiosas lecciones de vida que pude aprender de ellos.

A Dios, Padre Celestial, por bendecirme y permitirme completar este proceso.



## **Agradecimientos**

Mi sincero agradecimiento a mi tutor de tesis y profesor de la Universidad Andina Simón Bolívar, Eduardo Noboa. Su retroalimentación, recomendaciones y perspectiva me ayudaron a encaminar mi investigación en la dirección adecuada.

También estoy muy agradecida con los docentes de la maestría de investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo de la UASB, en especial con William Sacher y Melissa Moreano. Sus revisiones en la fase inicial del desarrollo de la tesis me ayudaron a refinar mis ideas.

Finalmente, resulta importante reconocer al ingeniero Marcelo Arroyo. Sus aportes sobre el tema de la producción de biogás en rellenos sanitarios y la situación actual de esta tecnología en la ciudad de Quito enriquecieron este trabajo.

Las contribuciones de todos los mencionados hicieron posible esta tesis.



## Tabla de contenidos

Figuras y tablas .....	13
Abreviaturas.....	15
Introducción.....	17
Capítulo primero Uso de biogás en países industrializados .....	23
1. Alemania: bioenergía desde el campo .....	23
2. Japón: pérdidas y oportunidades después de un accidente nuclear .....	29
3. Estados Unidos: iniciativas urbanas desde gobiernos pequeños .....	36
Capítulo segundo Uso de biogás en Latinoamérica.....	43
1. Bolivia: digestores para solucionar la inequidad energética .....	43
2. Colombia: residuos que energizarán el sector industrial .....	49
3. México: compromiso sin consciencia.....	55
Capítulo tercero Aciertos y errores aprendidos sobre el uso del biogás.....	61
1. Aprovechamiento energético del biogás: el mejor y peor de los casos .....	61
2. Factores esenciales para el uso del biogás como recurso energético .....	65
3. Limitaciones para el biogás como recurso energético.....	66
Capítulo cuarto Potencial y factibilidad de la energía con biogás en Quito.....	69
1. Cantidad de biogás generado en Quito .....	69
2. Biogás en Quito: situación actual y perspectivas futuras .....	72
3. Fortalezas y debilidades para ampliar el uso de biogás en Quito .....	77
Conclusiones.....	81
Lista de referencias .....	87
Anexos.....	97



## Figuras y tablas

Figura 1. Ilustración sencilla del proceso de digestión anaerobia Fuente y elaboración: Grupo Sanchiz (2016).....	17
Figura 2. Gráfico de la estimación de biogás generado en el relleno sanitario de Quito por año Elaboración propia.....	70
Figura 3. Gráfico de la estimación de electricidad generada cada año por el biogás del relleno sanitario El Inga Elaboración propia .....	71
Tabla 1 Emisiones de metano calculadas en el inventario de GEI para el DMQ – año base 2011 .....	20
Tabla 2 Cuadro comparativo de fortalezas y debilidades del sector biogás en países analizados .....	62



## Abreviaturas

AR	: Aguas Residuales
BENLESA	: Bioenergy Nuevo León SA
CEL	: Certificados de Energía Limpia
CH <sub>4</sub>	: Metano
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de Carbono
EEG	: Erneuerbare Energien Gesetz. Ley de Fuentes de Energía Renovable
EE. UU.	: Estados Unidos
EPA	: Environmental Protection Agency. Agencia de Protección Ambiental
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
GWh	: Gigavatio hora
kWh	: kilovatio hora
MWh	: Megavatio hora
LPDB	: Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos
NIMBY	: Not In My Back Yard. No en mi patio trasero
PTAR	: Planta de Tratamiento de Agua Residual
RSU	: Residuos Sólidos Urbanos
UE	: Unión Europea



## Introducción

En términos técnicos, la quema de combustibles fósiles es considerada la causa principal del cambio climático. Esta actividad genera 73 % de las emisiones de gases de efecto invernadero GEI (Molina, Sarukhán y Carabias 2017, 124), que acentúan el calentamiento natural del planeta y alteran el clima global. Se estima que los combustibles fósiles son usados para abastecer a tres sectores en las siguientes proporciones: 18 % de la energía fósil es para el transporte, 19 % para la construcción, y 43 % se usa para la generación de electricidad. Por tanto, el sector energético actual es un emisor significativo de GEI y un contribuyente importante en el cambio climático.

Es por eso que se han realizado muchos esfuerzos a nivel mundial para encontrar e implementar nuevas fuentes de energía, bajas en emisiones de GEI. En la búsqueda, han surgido varias opciones. Una de ellas es la biomasa. Y dentro de esta categoría, está la opción de la degradación bioquímica de residuos orgánicos. Este proceso consiste en la descomposición de la materia orgánica hecha por microorganismos en ausencia de oxígeno (Spellman 2014, 213), una reacción bioquímica conocida como digestión anaerobia (Cheng 2017, num. 6.1; traducción propia). El producto obtenido de esta reacción es el biogás, una mezcla gaseosa de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y metano  $\text{CH}_4$  con el potencial de usarse como combustible para generar energía (Spellman 2014, 213; Cheng 2017, num. 6.1; traducción propia). Una representación gráfica del proceso se muestra en la Figura 1.

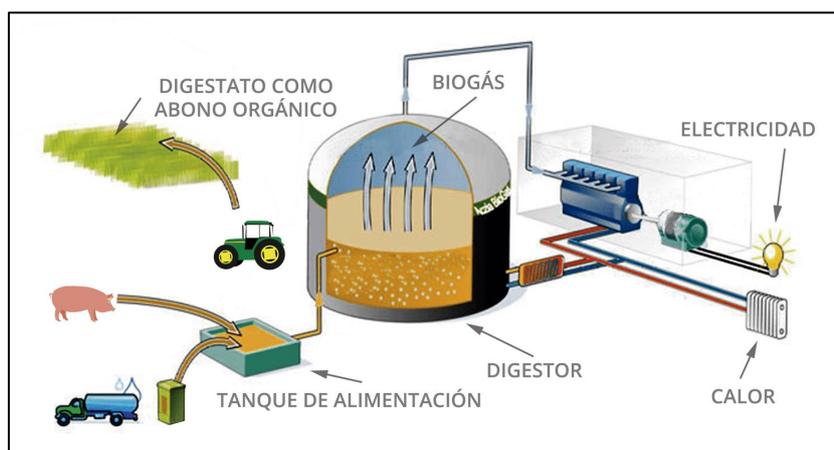


Figura 1. Ilustración sencilla del proceso de digestión anaerobia  
Fuente y elaboración: Grupo Sanchiz (2016)

El proceso de digestión anaerobia puede ocurrir en un digestor controlado o en un ambiente que reúna las condiciones necesarias, como un relleno sanitario. El biogás producido puede usarse para generar electricidad o calor, y/o reemplazar al gas natural después de ser procesado (McGeehan 2013, 2; traducción propia).

La captura del biogás resultante de la descomposición anaerobia de residuos orgánicos y su uso para producir energía es una acción que cumple con propósitos de mitigación y adaptación al cambio climático. Se trata de una alternativa que reduce emisiones de GEI asociadas a rellenos sanitarios y también conduce a la transición a energías renovables. Además, “por su habilidad de recuperar materia y energía [la digestión anaerobia] es considerada la mejor tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos” (Hadi et al. 2019, 1; traducción propia). A pesar de sus varias ventajas, el mundo no presta atención suficiente a la producción de biogás por digestión anaerobia. Según un informe de la Asociación Mundial de Biogás, presentado en la Cumbre Mundial del Biogás en 2019, esta es una alternativa de la que solo se está aprovechando el 2 % de su potencial y su implementación sostenible podría significar la reducción del 10-13 % de las emisiones actuales globales de GEI (Rico 2019, párrs. 1 y 4).

A fin de dejar claro el enfoque de este estudio, se incluye una breve explicación de las otras alternativas energéticas también consideradas como biomasa. En la literatura sobre energías renovables, el término “biomasa” engloba varias opciones. Se considera como “energía generada por biomasa” a aquella energía cuyas fuentes son: los residuos orgánicos, la biomasa tradicional, y los cultivos energéticos.

Se llama biomasa tradicional a “los combustibles leñosos, los subproductos agrícolas y estiércol [que] se han quemado para cocinar y calentarse” (FAO 2008, 1). Con este método, la energía se obtiene de forma sencilla y directa. Sin embargo, la combustión de biomasa tradicional es un método ineficiente al compararse con sistemas modernos (Castells 2012, 750) y no es compatible con las necesidades energéticas actuales. También es importante mencionar que el uso de biomasa tradicional para obtener energía produce “severos impactos en el ambiente y en la salud humana” (Garfí et al. 2016, 600; traducción propia).

Por otro lado, los cultivos energéticos son producción agrícola que será transformada en biocombustibles, generalmente de tipo líquido. La cosecha de estos cultivos se convierte en carburantes como el biodiésel o el etanol, que pueden ser usados en motores de combustión interna (Nogués, García-Galindo y Rezeau 2010, 21). Una preocupación ligada a la producción de biocombustibles líquidos es la competencia

generada entre cultivos energéticos y cultivos alimenticios. Para ilustrar esta problemática, se puede tomar el caso de Argentina, el primer exportador y tercer productor mundial de biodiésel a base de soja. Desde el 2000 hasta el 2005, se cuantificó que 4,6 millones de hectáreas antes usadas para cultivar frutas, verduras y cereales, producir lácteos y mantener ganado, fueron reemplazadas por plantaciones de soja (Pengue 2005, citado en Antoniou et al. 2010, 26). Actualmente, la cifra de hectáreas ocupada por la soja podría acercarse a los 42 millones, que era el objetivo del Plan Estratégico Agropecuario lanzado en 2010 (García y Wahren 2016, 331).

Tomando en cuenta estas consideraciones, la digestión anaerobia de residuos orgánicos es una opción atractiva entre las alternativas de la energía con biomasa. Debido a que la fuente usada son residuos, no existen conflictos relacionados con la alimentación, como sucede con los cultivos energéticos. Además, la energía obtenida se puede distribuir como electricidad a la población, a diferencia de la biomasa tradicional cuya combustión solo genera energía en forma de calor y para un único hogar.

Por eso este trabajo de investigación considerará a los residuos sólidos urbanos como una fuente de energía renovable. Se toma como base la definición de energía renovable dada por el IPCC. De acuerdo al Reporte Especial de Fuentes de Energía Renovable y Mitigación al Cambio Climático, energía renovable es “cualquier forma de energía de fuentes solares, geofísicas o biológicas que es *reabastecida por procesos naturales a una tasa que iguala o excede su tasa de uso* [y] es obtenida por los flujos continuos o repetitivos de energía *que ocurren en el ambiente natural*” (Moomaw et al 2011, 178; traducción propia; énfasis añadido). Los conceptos *ambiente natural* y *procesos naturales* pueden sonar no apropiados para un contexto urbano debido a la frecuente separación que existe entre naturaleza y sociedad, típica del naturalismo propuesto por Philippe Descola (2001). Sin embargo, la generación de residuos sí podría considerarse como un flujo continuo y repetitivo de energía, debido a que es parte del funcionamiento de las ciudades.

Un tema importante que definir al hablar de biomasa como fuente energética renovable es la cuestión de sostenibilidad. Si bien la biomasa tradicional y los cultivos energéticos suelen catalogarse como energías renovables, su uso a largo plazo genera problemas ambientales como monocultivos, deforestación o erosión del suelo. Es por eso que este trabajo resaltaré el manejo responsable y consciente de recursos. Esto implica que la energía con biogás solo se considerará renovable si se obtiene de fuentes sostenibles. En términos de la IPCC, una fuente de energía es sostenible si es

inagotable, no daña al ambiente ni al sistema climático, produce energía a precios razonables a largo plazo, satisface las necesidades de la sociedad, y es compatible con normas sociales actuales y futuras (Moomaw et al 2011, 174; traducción propia).

Dependiendo de cuánto biogás generen, los residuos orgánicos podrían considerarse como una fuente de energía no aprovechada por un poblado, ciudad o país. Esta investigación plantea analizar el caso de la ciudad de Quito, con la hipótesis de que podría estar generando una cantidad significativa de biogás en sus rellenos sanitarios debido a la proporción mayoritaria de residuos orgánicos en la basura de la población. Según datos del 2013, el principal componente de los residuos de Quito son los de tipo orgánico que conforman el 53,2 % (Emgirs 2019, párr. 1).

Se sugiere que la producción de energía a partir de biogás tiene potencial en la capital del Ecuador no solo por la gran cantidad de residuos orgánicos sino también por cómo se gestionan. La disposición final de la basura del Distrito Metropolitano de Quito es un relleno sanitario, donde se compactan y entierran los residuos (Rivadeneira 2016, 9). Este es un ambiente de condiciones anaerobias en el que los residuos orgánicos se transformarían, como ya se explicó antes, en biogás. Al no ser capturado, el biogás, compuesto principalmente de CH<sub>4</sub> (Spellman 2014, 213), escapa a la atmósfera. Siendo el CH<sub>4</sub> un GEI con un efecto treinta veces mayor al CO<sub>2</sub> (Molina, Sarukhán y Carabias 2017, 58-9), y considerando la gran cantidad de vertederos alrededor del mundo sin procesos de captación para este gas, su emisión desde rellenos sanitarios contribuye de manera significativa al cambio climático.

El último inventario de emisiones de GEI realizado para la ciudad de Quito, en 2014 y con 2011 como año base, reporta que el sector Desperdicios emite 50,61 Gg de metano por año (Baca 2014, 17). Para poner este número en perspectiva, es necesario listar las emisiones de metano de los otros sectores considerados en el inventario. Estos valores se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1  
**Emisiones de metano calculadas en el inventario de GEI para el DMQ – año base 2011**

Sector DMQ	Emisiones de metano (Gg/año)
Energía	0.1
Procesos industriales	Sin resultados
Agricultura	6.02
USCUSS	1.38
Desechos	50.61

Fuente: Baca 2014  
Elaboración propia

Al observar la Tabla 1, es claro que la mayor parte del metano emitido por Quito viene de sus desechos. Si esta cifra se descompone en la aportación de sus subsectores: desechos sólidos, aguas residuales domésticas y aguas industriales, se obtiene que 3 % de ese metano viene de las aguas industriales, 24 % de las aguas domésticas y 73 % proviene de los desechos sólidos (Baca 2014, 17). Por lo tanto, se puede decir que los desechos sólidos son el emisor más importante de metano en la ciudad.

Todas estas consideraciones hacen que se levante la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es la factibilidad y las limitaciones técnicas y prácticas de obtener energía renovable a partir del biogás producido en la ciudad de Quito? Este trabajo tiene la intención de responder esta pregunta mediante el análisis del uso del biogás en otros lugares del mundo y la observación de la realidad interna de la ciudad que se eligió como sitio de estudio: Quito, Ecuador.

Como parte de la investigación, se realizó un análisis comparativo de seis países que aprovechan la energía del biogás: Alemania, Japón, Estados Unidos, Bolivia, Colombia y México. Se escogieron estos casos ya que destacan en el uso energético del biogás a nivel de país. Además, presentan diferentes escenarios y razones para usar este recurso. Por tanto, estudiarlos en conjunto permite dar una visión más completa del uso energético del biogás en el mundo.

La metodología usada para este análisis se basó en el estudio de Kristina Engdahl, quien hizo un contraste similar entre tres países europeos y mostró sus hallazgos resumidos en tablas. Un resumen de su metodología se incluye en el Anexo 1. Así, basándose en Engdahl, el presente estudio empieza con una revisión bibliográfica de las experiencias de los países mencionados. La revisión tuvo dos objetivos. El primero fue determinar el conocimiento existente, a nivel mundial, acerca de la digestión anaerobia de residuos para producir energía. En segundo lugar, se intentó caracterizar las ventajas y desventajas de esta fuente de energía para cada caso, así como los retos de su implementación y los requisitos para su funcionamiento exitoso. Los análisis de casos por país se incluyen en el primero y segundo capítulos.

El capítulo primero abarca los casos de países industrializados: Alemania, Japón y Estados Unidos, mientras que el capítulo segundo corresponde a países de Latinoamérica: Bolivia, Colombia y México. El análisis de cada país tiene una estructura de tres partes: descripción, historia y evaluación. Esta estructura de tres partes también se basó en el trabajo de Engdahl. La descripción incluye explicaciones de la disponibilidad y manejo de la tecnología, la existencia de acceso a la red nacional de

energía, y el uso que se da a los productos obtenidos del proceso. Además, se presentan cifras del porcentaje de demanda energética que cubre esta energía renovable en cada sitio. La sección Historia aborda las condiciones en las que se introdujo la producción de biogás, es decir, la existencia de un compromiso para una transición energética, un marco legal, financiamiento, inclusión de la producción en planes de desarrollo, y alianzas o falta de cooperación entre actores. Finalmente, se realizó una evaluación para cada caso: ¿Están los proyectos de biogás acordes con la realidad del país? ¿Existe la infraestructura necesaria? ¿Se tiene la experiencia necesaria? ¿Son inestables o inexistentes las políticas que apoyan el biogás? ¿Se puede cubrir el costo de inversión? ¿Se están realizando procesos de seguimiento? ¿Acepta el público esta tecnología? ¿Es realmente sostenible el biogás producido?

Es importante aclarar que el nivel de legislación es diferente para cada caso. Algunos de los países analizados tienen leyes, programas y proyectos de energías renovables a nivel nacional mientras otros solo han llegado a municipios, departamentos o ciudades. Del análisis comparativo, se obtuvieron lecciones para la implementación energética del biogás. Estos hallazgos se resumieron y colocaron en un formato de tabla, que se describe a profundidad en el capítulo tercero. Las lecciones aprendidas ayudaron a determinar si era posible usar el biogás como fuente de energía en Quito.

El capítulo cuarto tiene un objetivo propio y es evaluar la factibilidad y posibles obstáculos de la energía con biogás en la ciudad de Quito. Para lograrlo, se cuantificó el potencial energético de los residuos de Quito con un modelo para la generación de biogás: Landfill Gas Emissions Model (LandGEM). Es una herramienta de cálculo usada para cuantificar los gases generados a partir de residuos en un relleno sanitario. Además, se determinó la situación de la ciudad respecto a proyectos energéticos de digestión anaerobia, mediante información y documentos oficiales disponibles. También se tuvo ayuda de un experto en el tema, que aportó con su conocimiento para hacer más completo el análisis de la ciudad. Además de eso, el capítulo cuarto vuelve a mencionar las lecciones aprendidas de otros países que han apostado por usar biogás y las pone en contexto con la ciudad de interés.

El estudio de esta tecnología en otros países, la cuantificación de biogás generado, y la descripción de la situación actual del biogás y el sector Desperdicios, permitieron determinar si Quito *podría* o *debería* aprovechar la energía de sus residuos.

## Capítulo primero

### Uso de biogás en países industrializados

#### 1. Alemania: bioenergía desde el campo

Al hablar de energía generada por biogás, es necesario examinar el caso de Alemania. El biogás alemán constituye cerca del 50 % de la producción total de la Unión Europea UE (Theuerl et al. 2019, 1; traducción propia). Este es un número bastante importante al saber que la UE se considera un referente mundial en el tema de la energía eléctrica generada con biomasa (Scarlat, Dallemand y Fahl 2018, párr. 17; traducción propia). Por tanto, puede considerarse como un país con experticia en este tema. En Alemania se produce biogás desde las áreas rurales, usando residuos de actividades de ganadería como el excremento de animales. Un 44 % del material que procesan las plantas de biogás alemanas consiste en estiércol sólido y líquido (Maciejczyk 2017, 12). Además del estiércol, las plantas de biogás en Alemania utilizan residuos de crianza animal, residuos agrícolas y cultivos energéticos como materia prima (Daniel-Gromke et al. 2017, párr. 17; traducción propia). La producción de biogás en los campos es fuertemente apoyada en Alemania, debido a que se valora su potencial de contribuir a las zonas rurales y a su desarrollo (Scarlat, Dallemand y Fahl 2018, párr. 61; traducción propia). Otra razón para el apoyo es que la implementación de plantas de biogás no presenta un reto en el aspecto técnico. En Alemania, la tecnología aplicable en granjas es muy conocida y está bien desarrollada (Engdahl 2010, 37; traducción propia). Sin embargo, existen problemas que esta nación magnate del biogás no ha podido enfrentar. En los siguientes párrafos se analizará la producción de biogás agrícola en Alemania, las influencias y apoyo para su implementación, y las preocupaciones de financiamiento, sostenibilidad y percepción pública asociadas a este recurso energético.

El biogás de Alemania viene del sector agrícola, y los granjeros tienen un papel importante en la producción de este recurso energético. Una parte mayoritaria del biogás alemán se obtiene de plantas pequeñas, en granjas (Engdahl 2010, 22; traducción propia). El número de estas plantas ha crecido con los años. Eran 3750 en el año 2007 (Engdahl 2010, 26; traducción propia) y más de 7850 en 2013 (Appel, Ostermeyer y

Balmann 2016, párr. 2; traducción propia). Para el 2018, ya se cuantificaban 9000 plantas de biogás en granjas (Witsch 2018, párr. 5; traducción propia). Se estima que, en el 85 % de los casos, quienes operan estas plantas son granjeros (Appel, Ostermeyer y Balmann 2016, párr. 2; Appun 2016, párr. 8; traducción propia). El proceso bajo el que trabajan es sencillo. Los residuos agrícolas y/o ganaderos son colocados dentro de un digestor donde inicia el proceso de digestión anaerobia, generando biogás. De forma controlada, el biogás se quema para producir electricidad, la cual alimenta la red de energía alemana y hace que el granjero dueño de la planta gane una retribución económica (Appun 2016, párr. 8; traducción propia). Además de eso, el granjero obtiene el beneficio de quedarse con el residuo de la digestión anaerobia: el digestato. Varios autores concuerdan en que este residuo tiene gran valor, pues puede ser usado como fertilizante de alta calidad (Daniel-Gromke et al. 2017, párr. 29; Lebuhn, Munk y Effenberger 2014, párr. 11; Maciejczyk 2017, 14; Zurita 2016, 17). Sin embargo, no se ha encontrado información acerca de su uso, su rendimiento, ni su calidad en comparación al fertilizante tradicional para Alemania.

De modo que, el beneficio más significativo que reciben los granjeros alemanes al construir una planta de biogás en sus tierras son las compensaciones monetarias. La capacidad de ganar dinero con estos proyectos hizo que se acuñara la expresión “de granjero a emprendedor de energía”, pues los ingresos del biogás llegaron a ser más altos que los de la producción de lácteos (Lebuhn, Munk y Effenberger 2014, párr. 18; traducción propia). Al considerar la rentabilidad, no es una sorpresa que los actores más activos en la fase de inicio de estos proyectos sean los mismos granjeros (Engdahl 2010, 37; traducción propia).

En pocas palabras, la producción de biogás en Alemania se basa en un sistema que usa residuos de actividades campesinas y brinda incentivos económicos a los granjeros para que se sumen al proyecto. Bajo esta modalidad, se ha logrado que la energía producida con biogás abastezca a 8 millones de hogares en Alemania, lo cual representa el 8 % de la energía renovable del país (Witsch 2018, párr. 4; traducción propia). El aporte puede parecer pequeño pero, al considerar que Alemania necesita llegar al 26 % de energía producida por biomasa para cumplir con su meta de reducción nacional de emisiones del 100 % en 2050 (Appun 2016, párr. 51; traducción propia), se puede considerar que van por buen camino. Estos primeros pasos para poner al biogás dentro de la matriz energética de Alemania no fueron sencillos. Se requirió de un gran esfuerzo por parte del gobierno alemán y europeo.

El biogás en Alemania pudo prosperar gracias al interés en una transición energética, la implementación de leyes nacionales, y el apoyo económico y burocrático del gobierno. Alemania es parte de la UE, comunidad que se ha planteado objetivos muy ambiciosos respecto a cambio climático, en especial en temas de reducción de emisiones de GEI y uso de energías renovables. Un ejemplo de esto es su intención de construir una economía baja en carbono para el 2050 y reducir al menos 20 % de sus emisiones de GEI, comparadas con 1990, para el 2020 (Scarlat, Dallemand y Fahl 2018, párrs. 6 y 8; traducción propia). Para lograrlo, han aplicado planes y políticas a través de los años. En 2007, su plan Energy and Climate Change Package fue una propuesta que, junto con negociaciones a nivel nacional, empujó al gobierno alemán a establecer objetivos para el sector energético a futuro (Engdahl 2010, 22; traducción propia).

Se puede sugerir que la UE influyó en Alemania, y en otros países asociados a la coalición, para que tomaran acciones de mitigación al cambio climático. Sin embargo, los alemanes tenían sus propias razones para querer una transición energética. Siendo un país que importa casi el 70 % de su energía, Alemania es vulnerable respecto a su seguridad energética pues no tiene fuentes disponibles en su territorio ni puede obtener electricidad a precios bajos (Álvarez y Ortiz 2016, 21). De modo que la respuesta para dejar de depender de los combustibles fósiles fue favorecer a las fuentes de energía renovable (Lebuhn, Munk y Effenberger 2014, párr. 12; traducción propia). Alemania le dio a este plan el nombre de Energiewende, un ideal de transición cuyas bases datan de movimientos políticos y sociales existentes en la década de 1970 y que está apoyado por leyes desarrolladas en los últimos 20 años (Álvarez y Ortiz 2016, 9).

Las leyes fueron importantes para hacer que la energía con biogás en Alemania surgiera. El ejemplo más mencionado en varios artículos es la Ley de Fuentes de Energía Renovable, o EEG por sus siglas en alemán. Esta ley fue el principal instrumento para convertir a Alemania en el mayor productor de biogás en Europa (Zurita 2016, 17). Implementada en el 2000 y con el apoyo de otro instrumento legal, la Act on Feed-In of Electricity, la EEG permitió que las energías renovables pudieran acceder a la red de electricidad (Lebuhn, Munk y Effenberger 2014, párr. 10). Bajo su normativa, se da “prioridad en la conexión, mercadeo y distribución [a la] electricidad [producida] a partir de energías renovables” y se fija una “tarifa [...] garantizada por un período de 20 años” (Maciejczyk 2017, 15). La EEG fue lo que transformó a las plantas de digestión anaerobia en una alternativa atractiva de inversión para los granjeros y

generó un boom en la producción de biogás (Appel, Ostermeyer y Balmann 2016, párr. 1; traducción propia).

Lo establecido por la EEG se complementó con el apoyo del gobierno alemán. Los incentivos económicos tuvieron un rol importante en el desarrollo del biogás, como la enmienda de la EEG en 2009 que favoreció al biogás y a otras energías renovables al aumentar sus tarifas fijas (Engdahl 2010, 24 y 36; traducción propia). Otra facilidad que el gobierno otorgó fue la rapidez del trámite. Un inversor interesado en generar biogás desde su granja en Alemania podía completar el proceso de aplicación y autorización en un tiempo de 3 a 6 meses, suficiente para una planta a escala pequeña (Engdahl 2010, 40-41; traducción propia). Como ya se ha evidenciado con cifras previas, todo este apoyo hizo que Alemania llegara a tener miles de plantas generando biogás en granjas: una situación de provecho tanto para las energías renovables como para el desarrollo rural en el país. Y durante los 20 años de apoyo que el gobierno alemán le dio al biogás y a otras fuentes renovables, todo se veía muy prometedor y exitoso. Sin embargo, hay cuestiones que deben abordarse para que el biogás en Alemania pueda tener futuro.

A pesar de su implementación exitosa, el sistema de producción de biogás en Alemania tendrá que lidiar con cuestiones de financiamiento, sostenibilidad y percepción del público, en un futuro cercano o incluso en el futuro inmediato. En párrafos anteriores se mencionó que la EEG fijó las tarifas de la electricidad generada con biogás por 20 años, que se cuentan desde el 2000 y por tanto ya se han cumplido. Podría parecer que es el inicio de los problemas pero “el sector [del biogás en Alemania] ha estado en crisis desde el 2014, cuando se cortaron los subsidios a más de la mitad” (Witsch 2018, párr. 5; traducción propia). La razón para este recorte fue que, a pesar de las reformas a la EEG y las tarifas fijas, la producción de biogás no se volvió barata y de hecho “se mantuvo como una de las fuentes de energía más costosas” (Appun 2016, párr. 24; traducción propia). El precio fijo se vuelve un problema para mantener a largo plazo las plantas de biogás. Al dejar de contar con los subsidios a partir del 2021, será más difícil que los granjeros puedan actualizar sus equipos para cumplir con lo que el gobierno requiere y seguir siendo parte del sistema (Witsch 2018, párrs. 2 y 12; traducción propia). Los requerimientos son generalmente de seguridad, los cuales elevan el costo inicial de la planta (Engdahl 2010, 39-40; traducción propia) y podrían cambiar la situación del biogás siendo un buen negocio. De modo que esta industria está perdiendo su rentabilidad, y también su imagen de sostenibilidad.

Al examinar las cifras y los datos, es claro que la producción de biogás alemán está ligada a los cultivos energéticos, vínculo que posiblemente se volverá mucho más fuerte en el futuro. La siembra de cultivos energéticos con el objetivo de digerarlos con estiércol y otros residuos es una práctica común en la producción de biogás agrícola (Engdahl 2010, 25; traducción propia). La adición de estos cultivos mejora la producción de CH<sub>4</sub> (Theuerl et al. 2019, 10; traducción propia). Sin embargo, Alemania ha llegado al punto en que sus digestores anaerobios reciben más maíz que residuos ganaderos. Datos del 2017 muestran que el material procesado en las plantas de biogás alemanas se compone en un 44 % de estiércol pero en un 48 % de cultivos energéticos (Maciejczyk 2017, 12). La responsabilidad por este escenario no solo corresponde a granjeros que buscaban mejorar el rendimiento de sus plantas de biogás. Las reformas de la EEG del 2004 y 2009, que ofrecieron incentivos a las plantas que usasen cultivos energéticos (Daniel-Gromke et al. 2017, párr. 17; traducción propia), muestran que el desarrollo del biogás agrícola en Alemania ha estado orientado hacia el uso de cultivos energéticos desde sus inicios hace 20 años (Theuerl et al. 2019, 1; traducción propia). El extenso uso de cultivos energéticos en la producción de biogás alemán pone en tela de duda la sostenibilidad de esta energía renovable. Como se mencionó en la introducción, los cultivos energéticos no son considerados sostenibles dentro de este trabajo, debido a los conflictos con cultivos alimenticios. Además de eso, “[los cultivos energéticos] necesitan recursos, generan emisiones y podrían producir, de forma directa o indirecta, cambios en el uso de suelo” (Theuerl et al. 2019, 11; traducción propia).

Las preocupaciones generadas por los cultivos energéticos no son ajenas al gobierno. Es por eso que la legislación alemana “ha limitado el uso de suelo [destinado a] la producción de biogás” (Scarlat, Dallemand y Fahl 2018, párr. 42; traducción propia). Sin embargo, los cultivos energéticos serán cada vez más necesarios. La meta de Alemania para el 2050: lograr que el 26 % de su energía venga de la biomasa, se alcanzará solo con la expansión de cultivos energéticos, algo imposible de hacer de manera sostenible (Appun 2016, párrs. 52-3; traducción propia). Para empeorar la situación, la meta del 26 % provocaría que Alemania vuelva a su situación inicial de dependencia pues sería necesario *importar* biomasa para cumplirla (Appun 2016, párr. 53; traducción propia, énfasis añadido). El uso de cultivos energéticos para la producción de biogás tampoco ha pasado desapercibido por la gente lo cual ha causado, junto con el factor económico, que los ciudadanos tengan una opinión negativa del biogás.

La percepción del público sobre el biogás es mala debido a dos razones: el costo de la energía y el rechazo a los cultivos energéticos. Como ya se explicó antes, la EEG apoyó a las energías renovables al darles acceso a la red eléctrica y fijar su precio por 20 años. Los costos derivados de esta ley los cubrieron los usuarios, siendo los consumidores domésticos los más afectados pues pagan un valor mayor y no reciben exenciones como el sector industrial (Álvarez y Ortiz 2016, 13 y 120). La cuestión de precios no es un problema exclusivo del biogás, sino de toda la transición Energiewende. Su aplicación, sumada a los altos costos de producción de energía, hacen que Alemania tenga una de las mayores tarifas eléctricas para consumidores domésticos en Europa, superada solo por Dinamarca (Álvarez y Ortiz 2016, 116). Por lo tanto, la electricidad en Alemania es cada vez más libre de GEI pero cada vez más cara para sus ciudadanos. El número de alemanes que “gastan más del 10 % de sus ingresos en energía” va en aumento, a la vez que la cantidad de personas que consideran la transición energética como algo bueno se han reducido (Álvarez y Ortiz 2016, 120).

El público también siente rechazo hacia el biogás debido a los cultivos energéticos. El conflicto entre granjeros interesados en abrir plantas de biogás para aumentar sus ingresos y pobladores que se oponen a la “maizificación” del paisaje ha dividido las zonas rurales (Appun 2016, párr. 23; traducción propia). La llamada maizificación se refiere a extender las fronteras actuales de los cultivos energéticos. Quienes están en contra argumentan la ampliación arruinaría los paisajes en el sentido visual y ecológico (Appun 2016, párr. 23; traducción propia).

En resumen, se puede decir que la producción de biogás agrícola en Alemania tiene buenas bases ideológicas, políticas y legislativas, pero presenta cuestiones de financiamiento, sostenibilidad y opinión pública que deben abordarse ya mismo. Con 9000 instalaciones en granjas, el país se colocó en la cima de la producción de biogás gracias al apoyo del gobierno, pero todo este esfuerzo podría perderse si la industria no puede sobrevivir sin los subsidios (Witsch 2018). Además de eso, el uso de cultivos energéticos para la producción de biogás alemán se está volviendo insostenible. Producirá cambios de uso de suelo e inconformidad en la gente, y volvería a poner a Alemania en la misma posición de dependencia energética de la que quiere salir. Sin embargo no todo está perdido, hay opciones. Algunos expertos opinan que, para que la industria del biogás en Alemania se vuelva sostenible, es necesario que la producción utilice más residuos y menos cultivos energéticos (Theuerl et al. 2019, 17; traducción propia). Estos residuos podrían venir de los desechos orgánicos de las ciudades, ya que

menos del 3 % de todas las plantas de biogás alemanas utilizan residuos orgánicos domésticos e industriales (Daniel-Gromke et al. 2017, párr. 18; traducción propia).

Al considerar todo esto, se puede inferir que Alemania sirve como un caso con lecciones de lo que se debe hacer y prever al implementar el biogás como fuente de energía. Un marco legal adecuado y la inversión del gobierno sacaron adelante al uso de este recurso. El hecho de que la UE se moviera en la misma dirección respecto a una transición energética libre de carbono también ayudó mucho. Al mismo tiempo, Alemania descuidó el aspecto social y el de sostenibilidad relacionados con la producción de esta fuente de energía. El uso intensivo de cultivos energéticos para obtener biogás incomoda a los ciudadanos, crea conflicto entre campesinos y generará cambios en el uso de suelo. A pesar de ser un referente mundial en el tema, el futuro del biogás en Alemania en este momento es incierto.

## **2. Japón: pérdidas y oportunidades después de un accidente nuclear**

El siguiente caso a analizar es la isla de Japón, un país donde la energía con biomasa representó una oportunidad para recuperar la independencia energética que casi alcanzaron pero perdieron. Para entender el interés de Japón en la energía generada a partir de biomasa, o bioenergía, es necesario un poco de contexto. Al no tener reservas domésticas de combustibles fósiles excepto por algunas minas, Japón debía comprar petróleo, gas natural y carbón a otros países para abastecer de energía a sus habitantes (Kojima 2012, 4-5; traducción propia). Esta situación no era buena para el país, y llegó a su límite en la década de 1970. Los precios del petróleo en 1973 hicieron que Japón tomara la decisión de cambiar su matriz energética mediante el desarrollo de nuevas tecnologías y el uso de otros recursos (Kojima 2012, 5; traducción propia). En esta transición, que surgió por el interés del país en producir su propia energía y no para mitigar el cambio climático, la isla tenía muchas esperanzas en la energía nuclear. Para el 2010, 30,8 % de la energía de Japón provenía de centrales nucleares (Iwai y Shishido 2015, 177; traducción propia) convirtiéndose así en el tercer país del mundo con el mayor consumo de energía nuclear después de Estados Unidos y Francia (Kojima 2012, 5; traducción propia). En ese entonces, el gobierno japonés proyectaba un crecimiento para esta fuente. Se estableció como objetivo del 2030 que la energía nuclear produjera el 50 % de la electricidad de Japón, lo cual se lograría construyendo 14 centrales (Iwai y

Shishido 2015, 177; traducción propia). Sin embargo, el desarrollo planeado se vio abruptamente detenido por el accidente de Fukushima en 2011.

Después de este incidente, el gobierno japonés comenzó a ver a la biomasa como un recurso clave para generar energía renovable en sus propios territorios (Goh et al. 2019, 2; traducción propia). El interés del país en la bioenergía es claro, pues han explorado varias alternativas. Japón tiene experiencia con diferentes formas de producir energía con biomasa: plantas pequeñas de cogeneración que usan madera, producción de bioetanol y biodiésel, estudios para obtener combustible líquido a partir de algas, y digestión anaerobia (Yokohama y Matsumura 2015; traducción propia). Esta última, relacionada con el uso de residuos orgánicos, es la que se analizará a profundidad. Actualmente la biomasa no se usa mucho en Japón, pero sí se reconoce como una fuente con potencial en el sector energético (Yokohama y Matsumura 2015, 1079; traducción propia). En esta sección se describirá el uso de residuos sólidos urbanos y aguas residuales para producir biogás en Japón, incluyendo el manejo de los productos finales. También se desarrollará el contexto, los marcos regulatorios, y las ventajas que posee esta alternativa en Japón. Finalmente, se realizará una breve evaluación del uso actual de esta tecnología, mencionando sus costos, limitaciones de crecimiento y algunos problemas que ya se visualizan para una implementación a mayor escala.

En Japón, se obtiene biogás a partir de la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos RSU y aguas residuales AR, con manejos similares de los productos de reacción. Los desechos líquidos de la producción de cerveza, bebidas suaves, destilería, alimentos y químicos son tratados con procesos anaerobios en más de 300 instalaciones (Li y Kobayashi 2010, 35; traducción propia). La totalidad del biogás generado al tratar estas aguas se usa para producir electricidad y calor (Kang, Selosse y Maizi 2015, 57; traducción propia). Muchas plantas de tratamiento de agua residual PTAR pueden energizar su propio biodigestor o producir electricidad y hasta biocombustibles a partir del  $\text{CH}_4$  que generan (Li y Kobayashi 2010, 35; traducción propia). Además del biogás, las PTAR japonesas que realizan digestión anaerobia generan un residuo conocido como digestato. Este material posee un alto contenido de nutrientes, lo cual le da potencial para usarse como fertilizante. Sin embargo, este uso no es viable en la isla debido a la baja demanda y al exceso de nitrógeno. Las granjas en Japón son pequeñas, por tanto no hay un paisaje agrícola en donde este posible fertilizante pueda ser aprovechado (Li y Kobayashi 2010, 41; traducción propia). Además, el digestato como fertilizante podría producir nitrificación del ambiente debido a su alto contenido de

nitrógeno (Matsumura 2004, 134; traducción propia). En muchas áreas, no se puede usar este residuo como fertilizante sin haber hecho primero un tratamiento de remoción de nutrientes (Li y Kobayashi 2010, 44; traducción propia). Debido a esto, muchas de las PTAR que generan biogás en Japón descartan el tema del fertilizante y eligen la opción de quemar el digestato, proceso que también permite el aprovechamiento energético de la materia orgánica (Hadi et al. 2019, 16; traducción propia) pero que tiene sus propios impactos negativos para el ambiente y la salud humana.

También existen plantas de biogás que procesan RSU exclusivamente, y su número ha crecido con los años (Li y Kobayashi 2010, 47; traducción propia). Los productos de la digestión anaerobia en estas plantas se manejan de manera similar a lo que se describió para las PTAR. Potenciar el uso de los RSU tiene sentido al saber que este tipo de residuos llegaron a conformar el 53 % de las fuentes de biomasa disponibles para generar energía en el país (Kang, Selosse y Maizi 2015, 57; traducción propia). Pero los RSU no solo son una fuente abundante de biomasa en Japón, también son la mejor opción como material para producir biogás. Para la isla, se estima que sus RSU tienen el potencial más grande de recuperación anual de  $\text{CH}_4$  (Li y Kobayashi 2010, 41; traducción propia). A pesar de esto, el aprovechamiento energético del biogás producido con las AR y los RSU es escaso. Según datos recientes, la energía por biogás tan solo representa 2 % de la bioenergía consumida en Japón, bioenergía que a su vez representa solo 2 % entre todas las fuentes de energía que usa la isla (IEA Bioenergy 2018, 3; traducción propia). Sin embargo, ya se están realizando esfuerzos para que estos valores aumenten en el futuro.

El camino de la bioenergía con residuos en Japón comenzó con las circunstancias, siguió con los proyectos y leyes, y continuó con las ventajas asociadas a la situación del país. Dos factores influenciaron para que Japón eligiera el camino de la bioenergía: el accidente nuclear del 2011 y los problemas relacionados con la falta de espacio en la isla, asociado a su complicada situación con los residuos. Fukushima I dejó una severa afectación en Japón. En el año 2010, previo al accidente, Japón era capaz de producir dentro de sus propios límites solo el 20,2 % de la energía requerida para la vida y actividades económicas de sus habitantes (JPN Agency for Natural Resources and Energy 2017, 3; traducción propia). Este porcentaje se conoce como tasa de autosuficiencia energética primaria nacional, y el valor correspondiente a Japón es muy bajo con respecto a otros países industrializados. El accidente con Fukushima I agravó su situación. Después de que la central nuclear se viera afectada por el terremoto

y tsunami del 11 de marzo de 2011, se despertaron miedos en la población japonesa que provocaron el apagado de 54 reactores en 2012 (Kojima 2012, 18; traducción propia). Esto se tradujo en una reducción de la ya pequeña tasa de autosuficiencia energética, que llegó a un valor mínimo de 6,4 % en el año 2014 (JPN Agency for Natural Resources and Energy 2017, 3; traducción propia). Sin las centrales nucleares, el suministro energético de Japón quedó con un vacío. Vacío que se cubrió con combustibles fósiles traídos de otros países (Kojima 2012, 10; traducción propia). Así, Japón volvía a caer en dependencia energética. Con la necesidad de nuevas fuentes no fósiles de energía como antesala, Japón estableció en 2012 un sistema de tarifas fijas “para fomentar el ingreso de electricidad renovable” a su red energética (Yokohama y Matsumura 2015, 1079; Goh et al. 2019, 2; traducción propia). Bajo este plan, Japón amplió el escenario de sus energías renovables. A la energía solar, apoyada desde el 2009, se le sumaron la energía eólica, hidroeléctrica, geotermal y por biomasa (Edahiro 2012, párr. 3; traducción propia). Alcanzar la independencia energética era muy importante para Japón, sin embargo, el país también tenía otros problemas. Uno de ellos es su falta de espacio, lo que complica el manejo de residuos en el país.

Obtener energía a partir de residuos le sirve a Japón para aprovechar al máximo sus territorios. Varios autores concuerdan en que el espacio en la isla es reducido. En su análisis de gestión de residuos sólidos en varias ciudades, Tron (2011, 35) indica que “En Japón están acostumbrados al orden y tienen claros problemas de espacio”. Saito (2016, 41; traducción propia) explica que Japón promovió el reciclaje y la reducción de la tasa de residuos generados para manejar su problema de falta de espacio para rellenos sanitarios. Yokohama y Matsumura (2015, 1080; traducción propia) hacen notar que Japón no puede contar a los cultivos energéticos entre sus fuentes potenciales de biomasa, ya que la producción no es posible debido a la cantidad limitada de tierra cultivable en el país. Por tanto, Japón debe abordar sus proyectos con consciencia de sus limitaciones de área. En el tema de gestión y disposición final de residuos, esto significa “aspirar a la mayor eficiencia en recuperación energética [e] invertir fuertemente en el desarrollo de tecnologías y procesos para mejorar la gestión y decrecer los volúmenes de disposición final” (Tron 2011, 35). Usar residuos como fuente de energía cumple con estas características, lo que la convierte en una opción ideal para Japón. Es por eso que el gobierno ha decidido impulsar esta alternativa formalmente.

Japón ha apoyado la generación de energía con residuos orgánicos mediante la aprobación de proyectos y leyes. En 2002, el plan Biomass Nippon Strategy plantó las

bases para considerar a la biomasa como recurso energético e incluyó sus fuentes potenciales (Matsumura 2004, 129; traducción propia). Esta estrategia “posicionó a los RSU como una fuente principal de biomasa” con más potencial de generar CH<sub>4</sub> que los residuos ganaderos o las AR domésticas (Li y Kobayashi 2010, 47; traducción propia). Es importante mencionar que la Biomass Nippon Strategy se elaboró con apoyo de los siguientes ministerios: Ministerio de Agricultura, Silvicultura y Pesca, Ministerio del Ambiente, y Ministerio de Economía, Comercio e Industria, además de que contó con el apoyo de todo el gobierno japonés en el momento de su aprobación (Kurashige 2004, 559; traducción propia). Más o menos en la misma época, se reformó la Ley de Gestión de Residuos de Japón. En vigencia desde 1970, esta ley establece que los residuos domésticos generados por una prefectura debían tener su disposición final dentro de esa misma prefectura (Tron 2011, 40). Es decir, la basura se gestiona en el mismo lugar en que fue generada. Después de su reforma en el 2000, es una ley que también “promueve los residuos como combustible para facilitar a la industria energética su aprovechamiento” (Tron 2011, 40). Más allá del apoyo del gobierno, Japón es un escenario con sus propias facilidades respecto a esta alternativa.

Previo a su implementación, la energía a partir de residuos en Japón ya presentaba una ventaja. El aprovechamiento energético de residuos orgánicos en Japón fue beneficiado por la importancia que tiene la separación de basura allí. En la isla, los residuos son clasificados en distintas categorías desde su fuente de origen (Tron 2011, 42). Es decir, la persona, familia o institución que genera la basura es quien se encarga de separarla de forma adecuada. Esta práctica va más allá de una noción de ciudadanía responsable o convivencia armoniosa. Se trata de la responsabilidad de “no dejar que algo valioso se desperdicie” o *mottainai*, palabra japonesa para expresar una consciencia nacida en los días de escasez después de la guerra y también vinculada a la frugalidad del pensamiento budista y al sintoísmo que enseña el valor innato de las cosas (Whiting 2019, párrs. 1-3). Sin este sentimiento colectivo de evitar el desperdicio, la energía con residuos tendría un camino más complicado en Japón. Si la basura no fuese separada desde su lugar de origen, cualquier opción entre compostar los residuos, incinerarlos o generar biogás a partir de ellos implicaría un doble esfuerzo (Tron 2011, 42).

El sector del biogás en Japón está todavía en etapas tempranas. Sin embargo, ya es posible tener algunas impresiones acerca del funcionamiento de su sistema. Esta evaluación temprana abarcará cuatro aspectos: la efectividad del sistema de tarifas fijas, el costo de producir biogás, las posibilidades de expansión de la tecnología, y la visión

de la bioenergía planteada por Japón. La iniciativa de tarifas fijas determina el precio de la electricidad generada por fuentes renovables durante un periodo de 10 a 20 años (Edahiro 2012, párr. 1). Los primeros 10 años de implementación se cumplirán en el 2022, de modo que todavía no se puede evaluar el funcionamiento de este plan en Japón. Sin embargo, es posible visualizar un pequeño éxito. Para finales del 2017, en solo un año y medio, “la capacidad eléctrica para la biomasa aumentó [...] de 6 a 16 [gigavatios]” (Goh et al. 2019, 2; traducción propia), gracias a las tarifas fijas.

En cuanto a la inversión necesaria para mantener la producción de biogás, se puede decir que es un aspecto accesible para Japón. El costo operativo de las plantas de biogás japonesas es básicamente el precio de tratar el residuo de la digestión anaerobia, y se conoce que la forma más costo-efectiva para manejar este residuo es usarlo como fertilizante (Li y Kobayashi 2010, 44; traducción propia). Como ya se explicó en párrafos anteriores, Japón no tiene acceso directo a esta opción. Necesita realizar un tratamiento adicional para poder acceder a ella, sin considerar la falta de demanda por fertilizante en la isla. Por eso, el método preferido para manejo del digestato es la incineración. A pesar de no ser esta la opción más costo-efectiva, ninguna fuente de información oficial ni artículo reporta que los precios por quemar el digestato sean un problema para la producción de biogás japonés. Probablemente se deba a que la incineración también genera energía, la cual es aprovechada y vendida en algunos casos (Hadi et al. 2019, 16; traducción propia), cubriendo así parte de los costos del proceso.

Lamentablemente, ya se conoce que el biogás en Japón tiene limitaciones para expandirse. Si bien la tecnología tuvo éxito en áreas urbanas, sería difícil de replicar en zonas rurales. La razón para decir esto es que los campos de Japón no producen suficientes residuos orgánicos. Gran parte de los productos alimenticios se importan en lugar de ser cultivados en el país, por tanto, la cantidad de biomasa residual que viene del cultivo de alimentos en tierras japonesas es pequeña (Matsumura 2004, 129-30). Una solución para esto podría ser centralizar el proceso de digestión, pero un limitante importante en ese caso sería la necesidad de transportar a un solo lugar todos los residuos agrícolas y ganaderos (Yokohama y Matsumura 2015, 1084; traducción propia). Por eso, es probable que el biogás permanezca solo en las ciudades japonesas.

Aunque se le ha asignado un papel importante a los residuos orgánicos dentro de la bioenergía japonesa, otra forma de biomasa podría ocupar su lugar en el futuro. Tres autores en tres artículos diferentes coinciden en que el sector japonés de la bioenergía debe usar la biomasa de sus bosques. Yokohama y Matsumura (2015, 1079; traducción

propia) dicen que la reactivación del sector silvicultura es un incentivo para que Japón utilice la biomasa como recurso energético, Kurashige (2004, 559; traducción propia) añade que esta perspectiva incluso está considerada dentro de la Biomass Nippon Strategy, y Goh (2019, 2; traducción propia) junto con otros autores están de acuerdo en que no se podrán alcanzar los objetivos bioenergéticos fijados por el gobierno japonés: 4 % del suministro de energía debe venir de la biomasa para el 2030, si no se usan los recursos forestales. A pesar de que este último artículo menciona la importancia de prácticas sostenibles en el manejo de bosque, la propuesta de talar árboles para obtener energía que plantea Japón es preocupante. La insistencia de reactivar la silvicultura en el país podría generar escenarios de deforestación con el tiempo.

Para resumir esta sección, la bioenergía con residuos en Japón todavía no termina su desarrollo. Fue impulsada después del desastre de Fukushima en 2011, junto con otras energías renovables, porque la isla necesitaba alternativas inmediatamente. Se espera que la energía a partir de residuos siga creciendo, ya que es una solución para los problemas energéticos, de espacio y de gestión de residuos existentes en Japón. Su implementación fue exitosa debido al apoyo del gobierno y a la cultura de los ciudadanos. Todavía es muy pronto para evaluar el biogás y la bioenergía con residuos en Japón. No se puede decir si su forma de financiamiento funcionó o si todo el proceso de digestión anaerobia (incluidos los productos finales) se maneja de la mejor manera posible. Lo que sí se detectó fue una posible tendencia a futuro y una limitación bastante clara. La tendencia sugiere que Japón usará biomasa forestal para producir energía. Esta cuestión es preocupante, debido a que podría causar deforestación. La limitación es sobre la aplicación de la tecnología del biogás en zonas rurales. No se podrán instalar plantas generadoras de biogás en estos sitios, pues los campos no producen residuos orgánicos suficientes para alimentar los digestores.

Por lo tanto, Japón ejemplifica que usar residuos como fuente de energía sirve no solo para diversificar la matriz energética de un país sino también para aprovechar espacios y mejorar el manejo de residuos. La isla también nos muestra que la participación de los ciudadanos en la separación de residuos facilita el proceso de generar energía con biomasa residual. Sin embargo, también nos enseña que las visiones y planes a futuro para el biogás y otras formas de bioenergía pueden caer en lo insostenible con el ambiente. Es necesario continuar observando el progreso de Japón con el biogás, ya que es un caso que nos podría enseñar mucho más respecto a este tema.

### **3. Estados Unidos: iniciativas urbanas desde gobiernos pequeños**

Como último caso del capítulo, se hablará de una nación industrializada muy criticada por su falta de compromiso para solucionar el cambio climático: Estados Unidos EE. UU. Este es un país cuya posición sobre la crisis relacionada con el calentamiento de la Tierra es difícil de describir, ya que no es posible generalizar. No sería correcto decir que EE. UU. resta importancia al cambio climático, ni tampoco es verdad expresar que sí lo considera un problema serio. Existe un conflicto fuerte entre estadounidenses negacionistas y estadounidenses confirmadores del consenso científico sobre este tema, conflicto que abarca no solo a los ciudadanos comunes sino también a periodistas, empresarios y hasta políticos. No hay una postura fija sobre el problema, ni siquiera al nivel de los tomadores de decisiones. Esta incertidumbre hace que el país no avance en una dirección concreta respecto al cambio climático.

La existencia de este juego de tira y afloja en los EE. UU. respecto al cambio climático se debe a la estructura del gobierno estadounidense. Se trata de un sistema con características jerárquicas en el cual la ley federal está por encima de todo, pero también con elementos policentristas pues cada estado puede elegir sus propias leyes, por ejemplo, las climáticas (Bodansky, Brunnée y Rajamani 2017, 261; traducción propia). Esto implica que cada uno de los cincuenta estados que compone a EE. UU. puede decidir si ignorará el cambio climático o se planteará objetivos para adaptarse a ello o contribuir en su mitigación. En ausencia de una política climática que se aplique a todo el país, este sistema con varios niveles de gobierno permite que el cambio climático se aborde desde varios puntos (Nowlin 2019; traducción propia) y la lucha contra el cambio climático en EE. UU. no se trunque.

Después de exponer la fragmentada percepción del cambio climático en EE. UU., es más sencillo entender por qué la producción de biogás a partir de residuos en este país estuvo más ligada a legislaciones de calidad del aire en un inicio. El gobierno principal de EE. UU. abordó el problema de emisión de CH<sub>4</sub> de vertederos no en una ley de cambio climático sino en una ley de calidad del aire. La llamada Clean Air Act establece que, para rellenos sanitarios de un determinado tamaño, se debe instalar y operar un sistema de recolección y control del gas producido (US EIA 2019, párr. 4; traducción propia). Gracias a esta legislación, la captura de biogás redujo emisiones de GEI y se usó para generar energía. Datos del 2018 indican que se recolectaron 270

billones de pies cúbicos de biogás desde 352 vertederos estadounidenses, que produjeron 11 billones de kilovatios hora kWh los cuales representaron 0,3 % de la generación eléctrica en EE. UU. durante ese año (US EIA 2019, párr. 5; traducción propia).

Si bien la iniciativa dada por el gobierno federal es buena, estados como Nueva York han ido un paso más allá. Nueva York tacleó lo que podría considerarse la raíz del problema de emisiones de GEI desde vertederos: la gestión de residuos orgánicos. Y consideró a la digestión anaerobia su mejor solución. De acuerdo a Anthony Fiore, director del programa de energía en el Departamento de Protección Ambiental de la ciudad, “la digestión anaerobia es una manera relativamente sencilla de implementar de modo accesible un suministro estable de energía renovable en áreas urbanas densas” (Dahl 2015, 24; traducción propia). Es importante mencionar que, en contraste con el silencio del gobierno central, Nueva York aborda el tema del metano en vertederos desde la perspectiva del cambio climático al relacionarlo con las energías renovables. A continuación en el texto, se profundizará acerca de la situación de los procesos anaerobios para tratar residuos orgánicos en EE. UU., el ejemplo de Nueva York como estado que debe definir sus propios planes ambientales así como buscar alianzas para cumplirlos, y las trabas para pasar de la producción al aprovechamiento energético del biogás en EE. UU.

La situación de los tratamientos anaerobios de residuos en EE. UU. no es clara cuando se habla de digestores en granjas, pero hay más información respecto a instalaciones modificadas para recibir basura orgánica de ciudad, como plantas de tratamiento de agua residual PTAR. Los números de digestores anaerobios que operan en granjas no coinciden entre los autores. En 2015, Dahl (2015, párr. 4; traducción propia) reportó que se contabilizaban digestores anaerobios en 239 granjas de acuerdo a los datos del American Biogas Council. Dos años después, Sylvan (2017, 13; traducción propia) menciona en su artículo que existen 151 instalaciones de digestión anaerobia que utilizan residuos ganaderos. Y un documento más actual indica que hay 2000 digestores anaerobios a lo largo del país, sin realizar una distinción entre los rurales y urbanos (Dawson 2019, párr. 8; traducción propia).

Las instalaciones urbanas modificadas para realizar digestión anaerobia de residuos son un asunto mejor definido. Adaptar las PTAR ya existentes se ha vuelto la opción predilecta de las ciudades de EE. UU. para instalar digestores anaerobios, pues así no dependen de constructores privados (Rueb 2017, párr. 43; traducción propia). De

acuerdo a la American Biogas Council, esta modificación se ha realizado en 1241 PTAR de EE. UU. (Dahl 2015, párr. 4; traducción propia). Una PTAR modificada con digestores anaerobios que destaca por ser una de las más grandes del país es Newtown Creek, ubicada en Brooklyn, Nueva York (Dawson 2019, párr. 5; traducción propia). La añadidura de residuos orgánicos comerciales (es decir, sobrantes de comida de restaurante y catering) a los tanques de esta PTAR comenzó como un proyecto piloto en 2012 (Rueb 2017, párr. 44; traducción propia). En 2016, Newtown Creek ya procesaba 3 % de los residuos de comida producidos por la ciudad cada día, en total 130 toneladas (Dawson 2019, párr. 5; traducción propia). Añadir residuos de comida a la PTAR mejoró el proceso de digestión anaerobia con el que se trataban las aguas residuales, pues se reportó un incremento del 17 % en la producción de biogás inicial (Rueb 2017, 44-5; traducción propia). Se espera que la adición de residuos orgánicos en las PTAR de EE. UU. aumente en el futuro, debido al potencial que tiene. Se estima que, de los 200 millones de toneladas por año de RSU producidas en EE. UU., 60 % son apropiados para la generación de biogás pues consisten en residuos de comida, papel, hojas y césped (Ingersoll 2010, 41; traducción propia). Sin embargo, establecer esta función en las PTAR depende de cada estado.

Como ya se mencionó antes, cada estado de EE. UU. juega según sus propias reglas. Así que esta parte del texto analizará como ejemplo el caso del estado de Nueva York, por ser el que tiene las instalaciones más grandes para producir biogás a partir de residuos municipales. Nueva York optó por la digestión anaerobia no solo con el interés de generar energía renovable sino para mejorar su costosa gestión de residuos, por lo cual evaluó sus opciones y buscó alianzas con el sector privado. La crisis de residuos en Nueva York puede resumirse en el hecho de que la basura debía enviarse a otros sitios. El último vertedero dentro la ciudad de Nueva York, la más grande del estado, cerró en 2001 (Teotia 2013, 13; traducción propia). Por tanto, la exportación de basura hacia rellenos sanitarios en otros estados era la única forma para su manejo (McGeehan 2013, 1; Teotia 2013, 12; traducción propia). La gestión de residuos en Nueva York consistía en enviar 2,9 millones de toneladas de residuos a vertederos lejanos cada año (Teotia 2013, 12; traducción propia). Esta práctica no solo implicaba lavarse las manos y pasarle el problema de los residuos a otro, también era un “drenaje financiero al presupuesto de la ciudad” pues manejar así la basura costaba \$360 millones al año (McGeehan 2013, 2; traducción propia).

Para encontrar una salida a esta situación, Nueva York analizó sus opciones. Una comisión de evaluación de tecnologías para gestión de RSU que sean viables económicamente comenzó en 2004 y concluyó en 2006, cuando se determinó que el procesamiento térmico y la digestión anaerobia eran las opciones más prometedoras (Sylvan 2017, 9; traducción propia). Lo que decidió cuál de las dos era la mejor fue el costo. Con modelos, se estimó que las tarifas para instalaciones de digestión anaerobia costarían entre \$43 y \$65 por tonelada bajo un manejo público y \$56 a \$80 por tonelada con manejo privado, y ambos rangos de precios fueron menores a lo que se pagaría por el procesamiento térmico (Sylvan 2017, 14; traducción propia). Así, Nueva York decidió implementar la digestión anaerobia como la forma de manejar sus residuos y solicitó ayuda al sector privado para hacerlo.

Las alianzas entre sector público y privado fueron un factor clave para implementar proyectos de digestión anaerobia de residuos en Nueva York, y también en otras ciudades de EE.UU. Las colaboraciones público-privadas han sido positivas pues, a través de una de ellas, la PTAR Newtown Creek empezó a procesar residuos orgánicos municipales. Fue la alianza entre el Departamento de Protección Ambiental de la ciudad de Nueva York y la empresa National Grid lo que logró que Newtown Creek se volviera, desde 2013, una PTAR destacable por codigerir aguas residuales con basura orgánica, generar energía y reducir emisiones de GEI sin costo para los contribuyentes (Hooks 2017, párrs. 5-7; traducción propia). Siguiendo el ejemplo de Nueva York, otras ciudades han buscado la ayuda del sector privado para manejar sus desechos de formas más sostenibles. Una instalación privada que procesa residuos de restaurantes se abrió recientemente en Salt Lake Los Angeles, mientras que San Luis Obispo decidió enviar sus residuos de comida con una empresa privada especializada en su procesamiento (Dawson 2019, párrs. 4 y 11). Estos ejemplos de California demuestran que las alianzas público-privadas son necesarias para expandir la digestión anaerobia de residuos en EE. UU. A pesar de que existe cooperación entre las leyes del estado y el financiamiento privado para impulsar el uso de digestores dentro de PTAR en Nueva York, existen trabas a nivel de país que impiden a esta tecnología extenderse.

Muchos proyectos en favor del ambiente para ciudades estadounidenses se ven truncados por problemas a escala de país, y la digestión anaerobia de residuos no es la excepción. El avance de los proyectos que generan energía con biogás se ve detenido por la cultura NIMBY, y la presencia y también ausencia de regulaciones federales. La palabra NIMBY es el acrónimo de la expresión Not In My Back Yard y, de acuerdo a

Tron (2011, 85), “representa la latente preocupación de la ciudadanía por colocar los servicios lo más lejos posible de su propiedad [por ejemplo] plantas de tratamiento”. Básicamente, las personas no quieren nada que perturbe de algún modo su zona residencial. El NIMBYsmo es un fenómeno que ha crecido en las comunidades estadounidenses, lo cual se traduce en un abuso de poder por parte de los residentes quienes detienen el progreso de los proyectos urbanos y generan un “limbo de status quo” (McGeehan 2013, 12-3; traducción propia). Eso demuestra que el pensamiento de “el pasado fue mejor” y “lo nuevo es malo” tiene bastante presencia en EE. UU. Tron (2011, 13) explica el apego a la situación actual como “sesgo de status quo” y la percepción excesivamente negativa de impactos asociados a algo nuevo como “sesgo de impacto”. Es posible que la presencia de estos dos sesgos en gran parte de la población estadounidense dificulte el avance de los proyectos de digestión anaerobia de residuos.

Otra traba a este tipo de proyectos son las regulaciones federales. Tanto su presencia como su ausencia representan un obstáculo para implementar la digestión anaerobia de residuos en EE. UU. Las regulaciones federales actuales no apoyan la generación de biogás a partir de residuos de comida. En lugar de eso las desincentivan, pues está establecido que el biogás producido en una PTAR tiene menor valor si se usaron residuos de comida como parte del material para producirlo (Dawson 2019, párr. 11). También la ausencia de regulaciones es un problema. En EE. UU., no existe ninguna ley que dé incentivos económicos a los proyectos de digestión anaerobia. La indiferencia del gobierno central hace que este financiamiento deba buscarse en el sector privado, una solución práctica pero con inconvenientes. Contratar a una empresa privada para que construya nuevas instalaciones de digestión anaerobia o adapte instalaciones ya existentes es costoso, y es la causa de que las ciudades se estén tardando tanto en implementar este tratamiento para sus residuos orgánicos (Dawson 2019, párr. 9).

Después de revisar toda la información encontrada, se puede concluir que la digestión anaerobia de residuos para generar energía es un tema que está avanzando en las ciudades de EE. UU. gracias a los gobiernos estatales y las empresas privadas. Sin embargo, se ve detenido por la falta de apoyo a nivel nacional y el rechazo de la población al cambio y a lo nuevo. Los estados que conforman este país pueden elegir si ignorar o abordar el problema del cambio climático. Del mismo modo, pueden elegir qué planes seguirán o no dentro de sus límites. Se puso como ejemplo el caso de Nueva York, que eligió la digestión anaerobia para solucionar su crisis de residuos y tener una

fuentes de energía renovable dentro de la urbe. Gracias a sus alianzas con el sector privado, este objetivo se logró. Ciudades en otros estados han seguido este camino. Sin embargo, poner en funcionamiento este tipo de proyecto es difícil. La ausencia de apoyo federal complica su avance, pues no hay ayuda financiera por parte del gobierno principal y los estados se ven forzados a acudir al sector privado. El presente NIMBYsmo en la población estadounidense es otra barrera. Hay un evidente rechazo hacia la construcción de cualquier instalación relacionada con gestión de residuos, rechazo que los ciudadanos expresan con fuerza y que tiene poder de detener proyectos.

En su contexto de nación industrializada sin una postura fija sobre el cambio climático, EE. UU. puede plantear reflexiones importantes sobre la implementación de energías renovables, como lo es el biogás producido por digestión anaerobia de residuos. Este país nos muestra que, ante la ausencia del gobierno principal, el sector privado puede cubrir el vacío e impulsar ese tipo de proyectos energéticos. Otra consideración importante es que adaptar infraestructuras ya existentes para que realicen digestión anaerobia es mucho más conveniente que construir edificaciones nuevas con el mismo fin. Además, el rechazo de la población es capaz de detener proyectos así que el poder de los ciudadanos no debe ser subestimado al plantear el aprovechamiento energético de residuos en una localidad. A pesar de sus opiniones divididas sobre el cambio climático, EE. UU. ha sido capaz de participar en acciones de mitigación y adaptación desde sus gobiernos pequeños.



## **Capítulo segundo**

### **Uso de biogás en Latinoamérica**

Este capítulo tratará tres experiencias de aprovechamiento energético del biogás que tuvieron lugar en América Latina. A diferencia de los anteriores, los casos abordados aquí se localizan en una zona complicada, marcada por sus relaciones de poder con países como Estados Unidos y España, y donde existen condiciones de desigualdad muy acentuadas. Latinoamérica es, como se verá más adelante, una región donde predomina la ausencia del Estado, las leyes pueden convertirse en trabas, y los recursos financieros son limitados. Los temas tratados en esta parte del texto podrían servir para plantear preguntas y discusiones destinadas a investigaciones futuras. Por estas razones, se ha elegido asignar a los casos latinoamericanos su propio espacio dentro de este documento. Sin embargo, la estructura de análisis para cada caso no ha cambiado. Las secciones en el presente capítulo tendrán las mismas tres partes establecidas en el inicio: descripción, historia y evaluación.

#### **1. Bolivia: digestores para solucionar la inequidad energética**

Al abordar el tema del biogás en Latinoamérica, un caso que no se puede dejar de mencionar es el Estado Plurinacional de Bolivia. En este país, considerado como el líder del biogás a pequeña escala en Latinoamérica (Scarlat, Dallemand y Fahl 2018, párr. 29; traducción propia), la digestión anaerobia de residuos significó una mejora en la calidad de vida de las poblaciones en áreas rurales. Podría considerarse un resultado predecible, sin embargo, tiene un impacto mayor al conocer que Bolivia es un país donde la electricidad es casi un lujo. La cobertura para el área urbana boliviana alcanza el 97 %, mientras que es solo del 61 % para la zona rural del mismo país, mostrando así la existente “inequidad energética” (GTCCJ 2017, 25). Es correcto llamarla inequidad, pues es un tipo de desigualdad que es evitable e injusta, y eso es precisamente lo que sucede. Bolivia no podría decir que le faltan recursos para dar energía a sus zonas rurales pues se considera que “tiene un superávit global de energía” y exporta excedentes de gas natural y GLP (GTCCJ 2017, 10). Así, todo se resume en que Bolivia distribuye sus recursos energéticos de forma arbitraria (Campero 2009, 2).

Ante esta realidad, los bolivianos que habitan zonas rurales se ven forzados a prescindir de la red eléctrica nacional y a obtener energía de otras formas. Productos usados frecuentemente son kerosén, gasolina, diésel y velas, pero estos materiales tienen dos problemas: su disponibilidad es escasa o su eficiencia es poca (Campero 2009, 2). Debido a esto, la alternativa energética más usada en las áreas rurales de Bolivia es la biomasa tradicional: madera y, en ocasiones, estiércol. Según datos del 2013, la demanda de energía en zonas rurales se cubre en un 80 %, y a veces en un 97 %, con biomasa tradicional y es una “situación que no ha cambiado” desde el 2000 (ONUDI y Energética 2013, 34). Una vez más, los datos muestran la “inaccesibilidad energética” de Bolivia rural, además de acentuar la ironía de que un país sea rico en gas natural y dependiente de biomasa tradicional al mismo tiempo (GTCCJ 2017, 23).

A pesar de ser más accesible que los derivados de petróleo, la biomasa tradicional también es poco eficiente como recurso energético, además de que fomenta la tala de bosques y afecta la salud humana. Por eso, era necesario buscar una fuente de energía más eficaz, accesible y sostenible para las zonas rurales de Bolivia. La población y los académicos locales consideraron al biogás, producto de la digestión anaerobia, como una posible respuesta. De modo que se realizaron varias pruebas de digestores en estas zonas, para generar energía localmente. El siguiente texto desarrollará estos temas más a profundidad. Se describirá cómo se produce biogás en Bolivia, el desarrollo de esta tecnología a través de proyectos que no tuvieron el apoyo del Estado, y los múltiples beneficios obtenidos al adoptar el uso de biogás en este país.

La producción de biogás boliviano es realizada por y para los habitantes de zonas rurales, con un aprovechamiento de todos los productos obtenidos pero sin posibilidad de crecer para volverse una fuente energética a nivel nacional. El biogás de Bolivia se produce solo en el área rural del país, con digestores anaerobios domésticos. La mayoría son de tipo tubular y hechos de plástico (Kranert et al 2012, 129; traducción propia). Los elementos para alimentar este digestor son fáciles de conseguir en el campo. Se deben colocar seis medidas de agua por cada medida de estiércol de vaca o cerdo dentro del digestor y esperar dos o tres semanas para obtener un flujo continuo de biogás, que servirá para cocinar o iluminar una casa (Beckman y Campero 2008, 543; traducción propia). El mantenimiento del flujo también es fácil. Hay que asegurarse de que el digestato, o residuo de la digestión anaerobia, se mantenga cubierto añadiendo más agua y estiércol cada par de días (Beckman y Campero 2008, 545; traducción propia). El agua se añade para diluir la carga de materia orgánica en el estiércol y evitar

que se forme una costra dentro del digestor (Martí Herrero 2019, 23). Así, con materiales disponibles e instrucciones sencillas, cualquier familia boliviana que posea tres vacas o diez cerdos puede tener “un biodigestor anaerobio doméstico [que será] una fuente confiable y constante de energía” (Beckman y Campero 2008, 543; traducción propia). Además del aspecto energético, los usuarios de biodigestores bolivianos obtienen beneficios del otro producto: el residuo de la digestión anaerobia o digestato.

Debido a su potencial para ser usado como fertilizante, el digestato es valorado al mismo nivel que el biogás en Bolivia rural. Mencionado en la literatura como biol, este residuo es un producto natural que además mejora los rendimientos de las cosechas (Martí Herrero 2007, párr. 4). El interés en su uso comenzó en los años 2007 al 2010 (Pazmiño 2016, 22), época en la cual los productores consideraban el biol como un fertilizante limpio, orgánico y eficiente (Beckman y Campero 2008, 546; traducción propia). Unos años después, sus beneficios ya se documentaban y podían respaldarse con cifras, como los reportes acerca de cultivos de quinua que redujeron sus pérdidas por heladas en un 30-20 % debido a la aplicación previa de biol (Martí Herrero 2013, 1). Todavía queda mucho que investigar y validar respecto a los bioles en Bolivia. Aun así, los usuarios de digestores ya consideran la producción de digestato o biol tan importante como la de biogás. Por lo tanto, se puede decir que el biodigestor doméstico funciona y es bien aprovechado en las zonas rurales de este país.

Sin embargo, el biogás no aparece en la matriz energética de Bolivia. Datos recientes contabilizan más de 1000 biodigestores domésticos funcionales en las zonas del altiplano y Cochabamba, pertenecientes a pequeños productores lecheros (Scarlat, Dallemand y Fahl 2018, párr. 29; traducción propia; Martí Herrero 2013, 2), pero ninguno alimenta a la red nacional de electricidad. Existe en la matriz boliviana un valor de 6 % listado como biomasa, pero este se refiere a bagazo de caña, cáscaras de castaña y cascarilla de arroz usados en generación termoeléctrica (ONUDI y Energética 2013, 23 y 26). La posibilidad de que el biogás ingrese a formar parte de este porcentaje es mínima, casi nula, debido a los grandes vacíos de conocimiento existentes en el país respecto a esta tecnología. Bolivia no ha investigado sobre sistemas de biogás a gran escala, incluyendo posibles patrones para la transición (Lönqvist et al. 2018, 495; traducción propia). A pesar de esto, no se puede negar la fuerte presencia del biogás en Bolivia rural. Presencia que se logró sin un marco legal ni financiamiento estatal pero sí con base en las experiencias de proyectos iniciales, las cuales revelaron las barreras para la implementación de esta tecnología.

La historia del biogás en Bolivia se estableció con proyectos que no tenían ninguna forma de apoyo del Estado, pero sí lograron revelar e incluso superar las limitaciones para el uso de digestores en el país. Los primeros intentos para usar el biogás como recurso energético en Bolivia sucedieron hace 40 años. Se reporta que el biodigestor doméstico en Latinoamérica se probó por primera vez a inicios de la década de 1980, cuando la Organización Latinoamericana de Energía OLADE intentó promover esta tecnología en Bolivia, Guyana, Haití, Jamaica y Nicaragua, con apoyo de la Cooperación Alemana Técnica GTZ (Garfí et al. 2016, 600; traducción propia). Además de estos esfuerzos, la Universidad Mayor San Simón de Cochabamba, Bolivia realizaba sus propias investigaciones que dejaron como legado una gran cantidad de información sobre diseño de digestores, uso y aplicaciones del biogás (Martí Herrero 2007, párr. 3). La universidad también logró conseguir financiamiento de la GTZ para armar un proyecto de biogás (Campero 2009, 3). Sin embargo, ninguno de los dos proyectos tuvo éxito. El proyecto de la OLADE terminó de instalar 65 digestores en los andes Bolivianos en 1992, solo para que fueran abandonados unos pocos años después (Garfí et al. 2016, 600; traducción propia). Mientras que el proyecto de la Universidad de San Simón, que terminó en 1995 y es considerada “la única experiencia importante a nivel nacional”, no tuvo éxito debido al aspecto social (Campero 2009, 3). Los fracasos no fueron en vano, pues permitieron conocer las dificultades específicas del uso de biodigestores domésticos en Bolivia rural, para identificarlas y atenderlas.

Los errores de estas primeras experiencias en el uso doméstico del biogás definieron con claridad qué se necesitaba para una implementación local exitosa. El proyecto de OLADE construyó biodigestores en Bolivia pagando el 100 % de su valor, pero sin hacer una capacitación o seguimiento (Garfí et al. 2016, 600; traducción propia). Sus errores fueron subsidiar todo el costo de los digestores y no instruir a los usuarios. Un nuevo proyecto, finalizado en 2011 y con 600 unidades instaladas, determinó que solo se debe subsidiar máximo un 50 % del costo de los digestores, y se requería un mínimo de seis meses de acompañamiento (Acosta 2012, 12 y 19). Por otro lado, el proyecto de la Universidad de San Simón de Cochabamba usó ladrillos y cemento para construir sus sistemas (Martí Herrero 2007, párr. 3), materiales que elevaron los costos de instalación hasta volverlos “inaccesibles para la población meta” (Campero 2006, 3). Se estima que los digestores familiares construidos con materiales convencionales llegaban a costar de \$3000 a \$4000 (ONUDI y Energética 2013, 41). Así, el precio se identificó como una clara limitación. Tiempo después, en 2007, el

proyecto de la ONG nacional Tecnologías en Desarrollo TED instalaría exitosamente 100 digestores entre La Paz y el lago Titicaca gracias a la simpleza del diseño y los materiales utilizados: polietileno y capas de plástico (Beckman y Campero 2008, 546; traducción propia). Si bien los obstáculos para una implementación local se superaron con investigación y creatividad, todavía existe la gran barrera de las limitaciones nacionales.

A pesar de todos los esfuerzos por parte de la academia, las ONG nacionales y los países extranjeros, la ausencia del gobierno nacional en temas de participación, incentivos e inicio de transición energética, detuvo el progreso del biogás boliviano. El Estado no colaboró en ninguno de los proyectos anteriormente mencionados. El financiamiento vino de países europeos, en especial Alemania, y el conocimiento se obtuvo de universidades y diversas organizaciones. Una organización destacable es TED, ONG procedente de Cochabamba, que empezó a trabajar desde 2001 para cerrar la brecha energética boliviana y volver a la tecnología accesible “donde la pobreza es más grande”: en Bolivia rural (Beckman y Campero 2008, 543; traducción propia). Además de no ser participante en estas iniciativas, el estado Boliviano tiene una gran responsabilidad en la falta de incentivos para la producción de biogás. Las autoridades no han implementado ninguna ley para apoyar el biogás en Bolivia. Y, aún si se planteara, las políticas nacionales existentes no darían el apoyo necesario para producir biogás ni en un nivel de fase introductoria (Lönnqvist et al. 2018, 500; traducción propia). El biogás está en desventaja desde un inicio, pues pierde atractivo debido a que el gas natural es más barato (Martí Herrero 2019, 54) llegando a costar solo 1/5 de su precio de exportación (Lönnqvist et al. 2018, 495; traducción propia). Además de no poder competir, el biogás requiere de una gran carga de trabajo por parte del gobierno boliviano para implementarse. Se considera que la transferencia tecnológica necesaria para producir biogás es compleja, más que cualquier otra fuente renovable, debido a que involucraría coordinar no solo al sector energético de Bolivia sino también su sector de manejo de RSU para operar eficientemente (Lönnqvist et al. 2018, 501; traducción propia). Se puede decir que esta tarea no será asumida o priorizada por el gobierno boliviano, al considerar su carente interés en una transición energética. En general, no hay interés estatal por apoyar alguna forma de energía baja en GEI. Al considerar los grandísimos subsidios para los combustibles fósiles y la ausencia de políticas que fomenten energías renovables, se puede notar una nula intención de iniciar un cambio en la matriz de energía de Bolivia (Lönnqvist et al. 2018, 495; traducción propia).

A pesar de haber tenido comienzos difíciles, y algunos errores que todavía necesitan corregirse, el biogás en Bolivia trajo beneficios significativos a los habitantes de áreas rurales, cuyo contexto fue un factor prioritario para la implementación. Si bien el uso de biogás en Bolivia se basó en un modelo de prueba y error, algunos de los errores no contribuyeron al aprendizaje. Se conoce que las experiencias fallidas de biogás en el país generaron desconfianza. Acosta (2012, 17) reporta que hay un sentir de resistencia a la tecnología en zonas donde antes se dieron proyectos sin éxito, los pobladores se sienten engañados y eso dificulta que acepten nuevos intentos. Esta es una limitación prioritaria para superar, pues se ha demostrado que los biodigestores son la herramienta ideal para mejorar la calidad de vida en Bolivia rural.

La energía con biogás mejoró la salud y subsistencia de la población rural boliviana. Los hogares que empezaron a usar biogás para sus necesidades energéticas observaron un impacto positivo en la salud de sus familias. Mientras que el uso de leña para iluminar y cocinar en casas y otros sitios cerrados genera humos y partículas causantes de enfermedades respiratorias, la combustión de biogás no produce humo ni ceniza (Martí Herrero 2007, párr. 7). Los digestores mejoraron la calidad de aire dentro de las casas y, por ende, la salud de sus ocupantes (Garfí et al. 2016, 611; traducción propia). Otro beneficio destacable del uso de biogás en Bolivia es que no representa una intrusión de alta tecnología en las formas de vida de los Quechuas y Aymaras (Beckman y Campero 2008, 546; traducción propia).

Un aspecto importante sobre el uso de biogás en Bolivia es que el proceso para implementarlo tomó en cuenta las condiciones de su población objetivo: habitantes de zonas rurales. Para este grupo, los digestores tubulares de plástico resultaron ser la mejor opción. Usar plástico redujo el precio del digestor hasta diez veces de lo que costaría uno tradicional (ONUDI y Energética 2013, 41), lo cual convirtió al digestor de plástico en uno de los modelos más económicos, y fáciles de transportar e instalar (Martí Herrero 2013, 2). Se buscó esta reducción de costos, además de las otras facilidades, considerando el nivel de ingreso económico de las familias rurales de Bolivia, pues la tecnología debía ser accesible para ellos ante todo (Acosta 2012, 12). Además de los costos, el biogás en Bolivia tuvo que considerar un factor propio del país: el clima. Los digestores tubulares resultaron económicos, pero era necesario evaluar su desempeño en climas fríos. Un proyecto a cargo de TED, llevado a cabo desde 2002 a 2006, puso este factor a prueba (Pazmiño 2016, 22). La experiencia mostró que el diseño tubular recolectaba el calor solar y mantenía los contenidos

internos a una temperatura constante (Garfí et al. 2016, 605; traducción propia), permitiendo que la degradación anaerobia continúe a pesar de las bajas temperaturas, como las del altiplano (Martí Herrero 2013, 2).

En resumen, Bolivia tiene una producción de biogás bien establecida, quizás la mejor investigada de toda Latinoamérica. A pesar de generarse solo a pequeña escala en digestores domésticos y con mínimas probabilidades de expansión, el biogás y la digestión anaerobia han beneficiado en gran manera a un sector de la población con carencias energéticas. Este logro se construyó con los aprendizajes-fracasos de los primeros proyectos, realizados a pesar del desinterés del gobierno boliviano en las energías renovables, y gracias al trabajo de universidades nacionales, organizaciones y financiamientos extranjeros. Debido a que la implementación tecnológica fue consciente con la realidad económica, logística y climática de la zona objetivo, el biogás trajo a la población de Bolivia rural una fuente de energía confiable, sostenible, libre de riesgos para su salud, y beneficiosa para sus actividades.

Bolivia nos muestra que el biogás no puede crecer a nivel de país sin apoyo del gobierno y con altos subsidios a los combustibles fósiles. Subsidios que, en este caso, ni siquiera benefician al sector más pobre de la población. La ausencia de participación estatal boliviana fue cubierta por académicos, ONGs e inversión extranjera. Gracias a ellos, se sabe que el biogás es útil para dar energía a poblaciones en pobreza y sin seguridad energética. Y no es necesario mantener la complejidad de la tecnología. Con ayuda de la investigación y experiencias, se pueden adaptar materiales, diseños o lo que se requiera. Así, la digestión anaerobia ha demostrado ser una alternativa llena de ventajas para Bolivia rural, una zona olvidada y desatendida por sus autoridades.

## **2. Colombia: residuos que energizarán el sector industrial**

Colombia y su visión para la bioenergía representan un caso relevante al analizar el biogás en América Latina. Desde inicios del 2000, este país ha mostrado un interés concreto para que la energía a partir de biomasa forme parte de su matriz energética. Sus primeros pasos se destinaron específicamente a impulsar los biocarburantes, su fabricación y uso dentro de territorios colombianos. Tomó tiempo, pero Colombia se comprometió con la producción de biocombustibles líquidos a partir de caña de azúcar y aceite de palma, y logró convertirse en uno de los productores más grandes en Latinoamérica (Contreras et al. 2020, 249; NL Agency 2013, 3; traducción propia). Para

asegurarse de que esta forma de energía se aproveche dentro del país, el gobierno reglamentó por ley que toda la gasolina y el diésel distribuidos en Colombia debían estar mezclados con un porcentaje específico de biocombustible líquido. Esto se conoce como “mezcla mandatoria” y establece, desde el 2005, que un volumen de gasolina debe mezclarse con etanol en una proporción del 10 % y un volumen de diésel debe mezclarse con biodiésel en una proporción del 5 % (Pérez y Acharya 2015; NL Agency 2013, 3; traducción propia). Este desarrollo de la bioenergía en Colombia, centrado en los biocarburantes, ha dejado de lado la producción de biogás. El interés nacional en esta fuente de energía apenas está iniciando.

El biogás no es un recurso desconocido para Colombia, pues se reporta que el proceso de digestión anaerobia de residuos agropecuarios y forestales se realiza en el país desde hace 40 años (Andrade et al. 2017, 111). Sin embargo, lo que sí es nuevo es su implementación como fuente de energía a nivel nacional. Recientemente, Colombia “ha empezado a promover el desarrollo de proyectos que fomenten el uso de residuos orgánicos para generar energía mediante la producción del biogás” (Contreras et al. 2020, 249; traducción propia). El objetivo principal al impulsar este tipo de proyectos es lograr que las empresas agrícolas se abastezcan de energía a sí mismas y, en caso de que se generen, enviar los excedentes a la red nacional de electricidad (Galán 2016, 14 y 52). Considerando esto, los párrafos a continuación expondrán la diversidad y también inexperiencia del sector biogás en Colombia, los pros y contras de su implementación en el país, y algunas razones de por qué podría caer en un estancamiento a pesar de representar una buena alternativa energética.

El biogás colombiano se produce en varias zonas y a diferentes escalas, pero su aprovechamiento energético es algo que todavía no se alcanza. En áreas rurales de Colombia, se genera biogás por la digestión anaerobia de residuos vegetales agrícolas, estiércol y purines de tipo vacuno, porcino, equino y avícola, y se utiliza para “suplir necesidades básicas de cocina e iluminación” (Andrade et al. 2017, 112-3). Ya que la mayoría de digestores en el área rural de Colombia son proyectos personales, contruidos y financiados por sus mismos usuarios sin ningún apoyo adicional, no existe un registro completo de cuántos hay en total (Acosta y Pasqualino 2014, 29). Por otro lado, también existen plantas de biogás a gran escala en el campo colombiano. Proyectos de esta magnitud ya podían contar con una forma de ayuda estatal. Las agroindustrias empezaron a interesarse por usar energía renovable debido a incentivos fiscales establecidos por el gobierno (Contreras et al. 2020, 249; traducción propia).

Con el fin de aprovechar estos beneficios y bajar sus costos, las industrias de alimentos y bebidas empezaron a tratar sus residuos líquidos con digestión anaerobia, para así producir biogás y obtener energía térmica a partir de él (Andrade et al. 2017, 112).

Por otro lado, el biogás en las zonas urbanas de Colombia se produce exclusivamente en plantas a gran escala y para la generación de electricidad. El biogás colombiano de ciudades proviene de instalaciones relacionadas con el manejo de residuos. Algunos ejemplos de esto incluyen plantas operativas en la PTAR San Fernando (Medellín), y en los rellenos sanitarios La Pradera (Medellín), El Guayabal (Cúcuta) y Doña Juana (Bogotá), lugares donde se produce biogás a partir de la degradación de AR domésticas y RSU (Contreras et al. 2020, 249-50; traducción propia). Entre todas las plantas de biogás nombradas, la del Relleno Sanitario Doña Juana es una de las más representativas de Colombia. Ha estado en funcionamiento, captando biogás y convirtiéndolo en electricidad, desde 2009. Sin embargo, siempre ha presentado problemas con su funcionamiento. Esto sucede porque el flujo de biogás producido en el relleno es variable, lo cual provoca que la generación de electricidad en la planta también lo sea (Contreras et al. 2020, 250-1; traducción propia). Ya que emitir un flujo de biogás variable es un comportamiento normal en un relleno sanitario, es probable que estas fallas se deban a que la tecnología para generar energía con biogás aún no está bien implementada en el país.

Aunque se produzca una cantidad considerable de biogás en Colombia, la mayoría no se aprovecha energéticamente. Por ejemplo, en el sector industrial, hay solo un caso exitoso en el uso de la biomasa residual para generar energía. Se trata de la industria de la caña de azúcar, liderada por el Ingenio Providencia S.A.: “la única compañía que ha logrado comercializar y distribuir [energía a partir de residuos orgánicos] en el país” (Galán 2016, 51). Este logro aún no se ha replicado, y quizás falte mucho para lograrlo. De acuerdo a Acosta y Pasqualino (2014, 27), muchos de los biodigestores a gran escala en el país queman su biogás para así reducir emisiones de GEI. Por tanto, es comprensible que la proporción del biogás en la matriz energética colombiana aún sea pequeña. Los datos oficiales solo consideran tres plantas, las únicas dentro de la red nacional, y cuantifican que la electricidad generada por biogás representa 5,5 MW ó 0,03 % de todas las fuentes de energía usadas por el país (Contreras et al. 2020, 250; traducción propia). La pobre capacidad de aprovechar energéticamente el biogás en Colombia probablemente se deba a que este recurso

apenas se está impulsando como energía renovable. Ese impulso se dio gracias al establecimiento de un pequeño marco legal, con sus aspectos positivos y negativos.

En Colombia, hay una única ley que apoya el desarrollo inicial de proyectos de biogás. Su aprobación muestra que los tomadores de decisiones empiezan a reconocer el potencial energético de los residuos producidos en el país, pero también evidencia una completa falta de apoyo estatal a iniciativas de biogás ya existentes. Se trata de la ley 1715, la cual promueve el uso de fuentes renovables de energía para así reducir las emisiones de GEI asociadas al sector energético (Galán 2016, 35). Gracias a una de sus secciones (número 18), en Colombia se considera como fuente de energía renovable a la “recuperación de energía a partir de residuos sólidos” (Alzate et al. 2018, 2). Además de definir lo que se considera fuentes renovables en el país, la ley 1715, implementada en 2014, también “regula la integración de [...] energías renovables al sistema nacional de energía” (Contreras et al. 2020, 252; traducción propia) e incluye incentivos para proyectos energéticos que sigan esa línea. Los incentivos ofrecidos son principalmente de tipo fiscal, como “deducciones superiores al 50 % sobre el valor total de la inversión a través del impuesto a la renta” o “depreciación acelerada de activos para la producción y uso de la energía” (Alzate et al 2018, 2). No hay un financiamiento directo de parte del gobierno. Por tanto, el dinero para construir proyectos de aprovechamiento energético de biogás debe venir de las industrias interesadas. A pesar de reconocer a los residuos como fuente de energía y dar incentivos para su uso, la ley 1715 tiene la falla de no ayudar a los proyectos de biogás ya existentes de pequeña y mediana escala.

Según lo establecido en la ley 1715, el gobierno colombiano apoyará los proyectos de biogás pero solo los que sean a gran escala y para la industria. Esta disposición excluye a los digestores domésticos rurales y a las plantas de biogás que generan electricidad para las ciudades, impidiéndoles así recibir apoyo nacional. La explicación de este enfoque está ligada a la visión colombiana sobre el aprovechamiento energético de residuos, cuyo propósito es usar la energía obtenida para alimentar al sector industrial (Galán 2016, 52). En otras palabras, Colombia ha decidido que los primeros consumidores y beneficiarios de la energía con biogás no sean los ciudadanos sino las empresas. Como ya se mencionó antes, la prioridad de Colombia es que sus agroindustrias se autoabastezcan de energía con sus propios residuos (Galán 2016, 52). De modo que usar la electricidad generada por biogás para consumo doméstico no está contemplado, al menos por ahora. El plan nacional para Colombia solo menciona enviar

bioenergía desde las plantas industriales a la red eléctrica nacional en caso de que se tengan excedentes (Galán 2016, 52).

A pesar de que el biogás como fuente de energía en Colombia tiene menos de una década de implementación oficial, es posible notar que el sector tiene gran potencial para crecer, a la vez que también presenta limitaciones económicas y legislativas. El biogás tiene futuro como alternativa energética en Colombia debido a que, según varios autores, es un país con condiciones ideales para la digestión anaerobia. En primer lugar, posee el clima apropiado para que la tecnología del biogás se desarrolle y opere sin problema (Contreras et al. 2020, 249; traducción propia) y sin necesidad de modificaciones. De hecho, se reporta que la degradación de residuos sucede más rápido en Colombia debido a sus altas temperaturas y humedad en aire ambiente (Acosta y Pasqualino 2014, 30). Además de sus características ambientales, otro factor por el que es ideal producir biogás en Colombia es su disponibilidad de materia prima. El país genera una gran cantidad de residuos por actividad ganadera y de agricultura, los cuales son sustratos apropiados para plantas que generan biogás (Kranert et al. 2012, 128). La biomasa residual generada en los campos de Colombia es tan abundante que, al elegir los cultivos con el mayor potencial energético según sus residuos, existen ocho opciones disponibles. Estos “cultivos representativos de la biomasa residual en Colombia” son: arroz, maíz, banano, café, caña de azúcar, panela, palma y plátano (Galán 2016, 26). Sin embargo, Colombia no podrá aprovechar estas ventajas de su contexto sin abordar primero las cuestiones sobre costos y normativas que limitan la producción de biogás.

El obstáculo económico más fuerte para el biogás colombiano son los precios, que deben ser cubiertos por las empresas interesadas sin ninguna ayuda del gobierno ni de otros actores. Construir plantas de biogás requiere de una inversión bastante fuerte. Las altas sumas de dinero necesarias para el transporte de residuos y para el desarrollo de plantas que transformen biomasa en energía han sido una barrera que detiene este tipo de proyectos (Galán 2016, 14). Esa podría ser la razón por la que todavía son pocas las empresas colombianas que se han animado a instalar plantas de biogás para generar su propia energía, pues tendrían que asumir la totalidad del costo. Además de que el gobierno colombiano no brinda ayuda financiera directa, es importante mencionar que ninguno de los artículos revisados menciona algún apoyo para estos proyectos en forma de inversión extranjera, excepto por un ejemplo: una planta de biogás en Nariño que fue donada desde Alemania (Contreras et al. 2020, 249; traducción propia).

Otra condición que evita que el sector del biogás crezca es lo establecido en la normativa colombiana. En el artículo de Andrade et al. (2017, 112), se explica que la legislación del país “exige una alta pureza [...] del biogás, estableciendo que el [CH<sub>4</sub>] debe estar presente en un 95 % en el biocombustible” para así evitar afectaciones en la salud humana, de animales y/o de plantas. Si bien el documento oficial se preocupa de velar por la seguridad de los ciudadanos y el ambiente, y varias normativas extranjeras de biogás también piden un porcentaje de pureza, este requerimiento debería estar complementado con distinciones acerca del tipo de digester o el tipo de sustrato que usan los digestores. Por sí mismo y tal como está en esa normativa, demandar un porcentaje de pureza solo representa un impedimento para “la masificación a gran escala del biogás en Colombia” (Andrade et al. 2017, 112).

Para finalizar, se puede decir que Colombia produce biogás tanto en el campo como en la ciudad, con diferentes sustratos y para diferentes usos, pero es un recurso no aprovechado energéticamente. La mayoría del biogás colombiano se quema, y se ha observado que los proyectos existentes para generar electricidad a partir de biogás no han alcanzado el éxito o su éxito no ha podido replicarse. El potencial de este recurso energético no fue reconocido por el estado hasta hace pocos años, en 2014. El gobierno colombiano reconoció en ese año a la energía obtenida con residuos como una fuente renovable, dándole acceso a la red nacional e incentivos para nuevos proyectos. La visión se enfocó en la industria, en darles a las empresas la capacidad de proveerse de energía a sí mismas. Aunque ha pasado menos de una década desde que Colombia decidió apoyar de forma oficial al biogás, se espera que su uso energético crezca significativamente debido a las condiciones climáticas y de disponibilidad de biomasa residual en grandes cantidades que posee el país. Sin embargo, el sector podría estar en peligro de caer en un estancamiento por las altas sumas de dinero requeridas para los proyectos y las normativas incompletas.

Actualmente, Colombia se encuentra en una etapa de surgimiento respecto a la implementación de biogás como fuente de energía. Su proceso, hasta ahora, deja algunos aprendizajes. Este caso enseña que un país puede tener ventajas en la producción de biogás si tiene las condiciones climáticas y la disponibilidad de biomasa residual adecuadas. Colombia también muestra que los incentivos fiscales son efectivos para despertar el interés de las empresas por proyectos bioenergéticos. Por otro lado, el alto valor de la inversión necesaria para su construcción puede limitar este tipo de proyectos, entre los que se incluyen las plantas de biogás. Las normativas también

pueden ser un problema, por lo que es necesario que las legislaciones respecto a biogás se realicen con conocimiento y no solo copiando lo que dicen otros países. Por último, es importante entender que no basta con tener muchas plantas de biogás. Para que esta tecnología tenga futuro, hay que asegurarse de que esté bien implementada. A Colombia todavía le queda un largo camino para lograr esto, y alcanzar su meta de tener un sector industrial autoabastecido por energía de residuos.

### **3. México: compromiso sin consciencia**

Como último caso de revisión, se tomará a los Estados Unidos Mexicanos: un país cuya experiencia con el biogás empezó bien pero terminó mal. México tiene menciones notorias en el tema de la energía generada con biogás. Su compromiso con la lucha contra el cambio climático es destacable, pues es el primer país no industrializado que ha decidido contribuir a la adaptación y mitigación de esta crisis. Además de esto, “el país ha sido identificado como un pionero en la generación de energía por biogás de vertedero, en Latinoamérica” (Alemán-Nava et al. 2014b, 4; traducción propia) y llegó a ser “uno de los [...] líderes en el desarrollo de la industria de la digestión anaerobia en el mundo” desde el 2002 hasta el 2005 (García y Masera 2016, 58).

Con el apoyo del gobierno y la ventaja de ser los primeros en aprovechar energéticamente el biogás de vertedero o relleno sanitario, México se proyectaba a ser un referente latinoamericano en el uso de esta fuente de energía. Sin embargo, en un punto del camino, se cometieron errores. Ahora, en la implementación del biogás como recurso energético, México es más bien un ejemplo de lo que no se debe hacer. Esta parte del texto explicará la difícil situación del biogás en México, la cual fue causada por una participación estatal que se limitó a aprobar leyes, y agudizada por la toma de decisiones realizada sin considerar el contexto del país.

La producción de biogás en México tiene lugar en la ciudad y en el campo, pero no es especialmente exitosa en ninguna de las dos áreas. El biogás en ciudades de México se produce en sus PTAR. Datos del 2017 identificaron que 27 PTAR mexicanas hacen procesos de digestión anaerobia y 9 de ellas obtienen calor y electricidad a partir del biogás producido (Gutiérrez 2018, 2). Estos números se ven poco alentadores, y lo son aún menos al considerar que el país tiene 2450 instalaciones de PTAR en todo su territorio (Ramírez, Medrano y Escobedo-Cazán 2020, 16). Al calcular porcentajes, se obtiene que solo 0,3 % de las PTAR mexicanas producen biogás y lo aprovechan

energéticamente. La situación se agrava al considerar que, incluso en localidades con una gran cantidad de PTAR, el aprovechamiento energético del biogás es escaso o carente. Por ejemplo, el estado de Tabasco posee 99 PTAR y en ninguna se aprovecha el biogás que producen sus lodos (Ramírez, Medrano y Escobedo-Cazán 2020, 13). En el campo sucede algo similar.

El sector rural de México produce biogás con digestores. Estas estructuras pueden ser de diversos tamaños, desde escala doméstica a planta, y la mayoría se han construido en granjas de cerdos y de vacas (IB Tech 2020, 21; Gutiérrez 2018, 2). Al igual que con las PTAR, los biodigestores en áreas rurales representan energía desperdiciada. A pesar de que el biogás sí se genera en estos digestores, son pocas las experiencias en que la mezcla gaseosa es aprovechada “con fines energéticos para reemplazar a los combustibles fósiles” (IB Tech 2020, 21). Se estima que existen 900 digestores rurales en México, que procesan estiércol y residuos agropecuarios, pero solo 300 usan su biogás para generar electricidad (Godoy 2020, párr. 14). Gutiérrez (2018, 2) reporta una cantidad de digestores cercana al dato anterior: 820, pero menciona que la mayoría de éstos no están en funcionamiento actualmente. Es claro que la producción de biogás en México se está desperdiciando. Esta afirmación se evidencia con datos del país en 2013 y 2014, al notar que el biogás solo representaba el 0,02 % de la energía producida en México durante esos años (García y Masera 2016, 25; Ruiz, Martínez y Vermerris 2016, 981; traducción propia). Dicho porcentaje se duplicó luego de 3 largos años, en 2017, cuando el biogás llegó a representar 0,04 % de la producción primaria de energía (IB Tech 2020, 20). Por tanto, el biogás en México no está aprovechando su potencial ni mucho menos creciendo. Es probable que la raíz de este problema se encuentre en el Estado mexicano y su idea de lo que es apoyar a una energía renovable.

Es importante recalcar que México sí estableció un marco legal para impulsar la producción de biogás, pero el rol del gobierno en este tema se limitó solo a eso: aprobar leyes sin exigir o dar herramientas para su cumplimiento. Esto se puede ilustrar mediante tres ejemplos. El primero es la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos LPDB, que fue promulgada en 2008 para mostrar el apoyo a la bioenergía por parte del estado Mexicano (Gutiérrez 2018, 4) y constituyó el primer elemento del marco legal del biogás en México. Al mencionar bioenergéticos, la ley se refiere a los biocombustibles líquidos y al biogás. Por tanto, el gobierno mexicano debió asegurarse de que ambas formas de bioenergía se apoyaran por igual. No lo hizo. Al revisar los programas derivados de la LPDB, se puede notar que todos dejan de lado el

biogás pues tienen como prioridad “la promoción del etanol y biodiésel como sustitutos de la gasolina y el diésel” (García y Masera 2016, 75). La decisión de darle preferencia a la producción de biocarburantes pudo estar motivada por las áreas de cultivo disponibles en México, pues es el tercer país en Latinoamérica con mayor cantidad de tierra disponible para la siembra (Alemán-Nava et al. 2014b, 2; traducción propia). De modo que el gobierno aprobó la LPDB pero no se encargó de exigir su cumplimiento según lo que estaba establecido.

Un segundo ejemplo para ilustrar que las leyes mexicanas sobre el biogás no fueron efectivas es la Reforma Energética. Decretada en 2013, su objetivo era “aumentar la participación de empresas públicas y privadas en el mercado de las energías renovables” (Hernández et al. 2017, 70). Es decir, fomentar las alianzas público-privadas que impulsaran proyectos energéticos renovables. Tales alianzas sirvieron en el pasado pues a través de ellas se construyó el proyecto BENLESA (Monterrey, Nuevo León), el primer proyecto latinoamericano para convertir biogás de vertedero en electricidad, y también la Corporación de Desarrollo Agrícola de Nuevo León, la primera planta generadora de electricidad con biogás (Alemán-Nava et al. 2014b, 2). Sin embargo, la Reforma no ha logrado que se den ese tipo de alianzas a nivel de país. Se sugiere que es debido al petróleo, y al obstáculo para la energía renovable que representa su consumo (Silva 2019, 1-2) y producción. En el caso particular de México, la idea de alianzas público-privadas a nivel nacional no funciona porque una gran mayoría de la industria no está interesada en cambiar de modelo y dejar de usar petróleo. Silva (2019, 6) llama a esta situación “resistencia institucional” y explica que el lento avance de las energías renovables en México, incluyendo al biogás, se debe a “la presencia abrumadora de empresas, instituciones e infraestructura de combustibles fósiles” las cuales obstruyen los procesos necesarios. Al aprobar la Reforma Energética, el Estado mexicano no otorgó ningún instrumento ni plan para destruir esta resistencia institucional. Por tanto, la aprobación de esta ley fue como otorgar permiso para dar un paso a un sector que no puede caminar aún.

El último ejemplo para ilustrar cómo el marco legal del biogás mexicano queda solo en papel es la Ley de la Industria Energética, aprobada para dar incentivos a las energías renovables. Sin embargo, los incentivos contemplados en esta ley no se tratan de un financiamiento directo. La Ley de la Industria Energética, vigente desde 2014, llama a los incentivos Certificados de Energía Limpia CEL (García y Masera 2016, 75). Básicamente se trata de una compensación económica pagada por cada megavatio-hora

MWh de energía limpia que se produzca y se venda para la red de electricidad mexicana (IB Tech 2020, 36). Se esperaba que este sistema creara un mercado para la bioenergía (García y Masera 2016, 75) pues los CEL son repartidos por la Comisión Reguladora de Energía en México y luego comprados o vendidos por los participantes interesados (IB Tech 2020, 36). En otras palabras, el gobierno no paga por electricidad producida con fuentes renovables, pero sí espera que alguien más la compre y así generar el dinero para financiar más proyectos. Hasta ahora, el sistema de los CEL no ha potenciado el sector del biogás en México. El resultado de este apoyo vacío por parte del gobierno fue que México se construyó un sector de biogás lleno de fracasos, como ya se describió en los primeros párrafos de esta sección. Sin embargo, el hecho de que la producción de biogás en México sea desaprovechada no se debe solo a leyes ineficientes, sino también a la ignorancia de los tomadores de decisiones sobre la situación energética del país.

Al evaluar el sector biogás en México y la forma en que se quiso establecer, se vuelve evidente que el contexto del país y sus implicaciones no fueron tomados en cuenta. La decisión de apoyar este recurso energético formalmente se hizo sin que México tuviera conocimiento sobre la bioenergía a gran escala, incentivos apropiados para producirla, instalaciones aptas, ni procesos de seguimiento. Refiriéndose al conocimiento, no puede dejar de reconocerse que México ha realizado muchas investigaciones sobre energía a partir de biomasa. En los últimos 30 años, el 75 % de las publicaciones mexicanas sobre energía renovable han tenido como tema principal a la biomasa (Alemán-Nava et al. 2014b, 1; traducción propia). Además, los artículos científicos producidos en México desde 1982 a 2012 llegaron a representar “el 1,1 % de la investigación mundial en este campo” (Alemán-Nava et al. 2014a, párr. 20; traducción propia) de la obtención de energía a partir de la biomasa. Sin embargo, esta extensa investigación nunca abordó el tema de la implementación a nivel nacional. De todos estos artículos, no destaca ni uno que estudie la bioenergía a gran escala en México (Alemán-Nava et al. 2014b, 1; traducción propia). Esto sugiere que México se confió de su gran conocimiento teórico y dejó de lado el conocimiento práctico al decidir impulsar el biogás, lo cual resultó en escasas experiencias exitosas.

No solo hacen falta estudios sobre el biogás a gran escala en México, también estímulos adecuados para su producción. En este aspecto, tal vez la ley de Industria Energética sea la más perjudicial dentro del marco legal del biogás. La razón para argumentarlo es que todo su sistema de incentivos está mal diseñado. Esto se debe al descuido de dos aspectos. Quizás el más importante sea que un mercado de bioenergía,

como el que propone esta ley, no puede formarse si es que existe en el país un “monopolio legal sobre la generación y distribución de energía [...] que [...] disuade a los productores independientes de electricidad” (Silva 2019, 8). Además de esto, los incentivos de la Ley de Industria Energética, llamados CEL, no están diseñados para apoyar la energía con biogás. Sus términos no cubren el autoconsumo, la generación de energía térmica, ni los otros beneficios adicionales que se pueden obtener de este recurso energético (IB Tech 2020, 37).

Además de carecer del conocimiento y los incentivos para producir biogás, México también carece de las instalaciones necesarias para hacerlo. No se trata de una cuestión de cantidad pues ya se mencionó antes que México tiene 2450 PTAR, las cuales se podrían adaptar para que realicen digestión anaerobia. El problema es la condición en la que se encuentran. De acuerdo a lo que menciona el artículo de Ramírez, Medrano y Escobedo-Cazán (2020, 16), la mayoría de estas PTAR están fuera de servicio u operan pésimamente. Arreglarlas requeriría de mucho dinero, y eso sin mencionar las adaptaciones necesarias para la digestión anaerobia. Debido a los escasos recursos que reciben, algunos municipios mexicanos no pueden permitirse pagar por el buen funcionamiento de sus PTAR (IB Tech 2020, 38), mucho menos por una adaptación con fines bioenergéticos. La negligencia del estado Mexicano respecto a la realidad de sus PTAR puede ser una causa para la fallida implementación de la energía con biogás en este país.

Después de mencionar las carencias anteriores, tal vez la siguiente no sea para sorprenderse. Sin embargo, también fue ignorada al decidir impulsar el aprovechamiento energético del biogás en México. Se trata de la falta de seguimiento existente en los proyectos. Es común que los digestores anaerobios rurales del país sean mal manejados o descuidados (Hernández et al. 2017, 79). Las razones para este abandono son varias. Pueden ser del tipo económico, como la incapacidad de recuperar la inversión, pero en su mayoría están relacionadas con la ausencia de un respaldo adecuado, como la inexistente capacitación de los usuarios y la ausencia de supervisión por parte de las autoridades competentes (IB Tech 2020, 21). Es probable que la falta de seguimiento evidenciada en el sector rural esté sucediendo también en el sector urbano, con las PTAR. Esto podría volverse un problema no solo porque reduciría aún más el aprovechamiento del biogás en México, también hay cuestiones de salubridad involucradas. El abandono de esta tecnología puede convertir a los digestores en “fuentes [...] de emisiones dañinas para la salud” (Hernández et al. 2017, 79).

Recapitulando todo lo mencionado, el biogás en México se produce escasamente y lo poco que se produce no se aprovecha en su totalidad para generar energía. El sector del biogás mexicano no es exitoso y tampoco está creciendo, y se sugiere que la razón para esto sea que el apoyo del gobierno se limitó exclusivamente a las leyes. México posee un marco legal para apoyar la producción del biogás: una ley que muestra su compromiso con las energías renovables, otra para fomentar alianzas público-privadas, y otra más para incentivos. Sin embargo, no se realizó seguimiento de los programas asociados, no se dieron herramientas para reducir la fuerte presencia del petróleo en la industria, ni se invirtió dinero estatal. Así, estas leyes no pudieron lograr sus objetivos. La responsabilidad por la situación del biogás en México no recae solo en el inestable marco legal, también se debe a que no se tomó en cuenta el contexto del país. Así, el biogás en México tuvo apoyo del gobierno pero ellos tomaron decisiones sin considerar las existentes carencias: la falta de conocimiento para producción a gran escala, incentivos mal diseñados, instalaciones defectuosas, y seguimiento escaso o nulo. Esto provocó que el biogás en México fracasara como recurso energético y se quedara estancado.

A pesar de no haber tenido buenos resultados con el biogás, la experiencia de México ayuda a reconocer con claridad los posibles errores al impulsar el uso de esta tecnología. En primer lugar, la participación del gobierno en la implementación de energías renovables no puede limitarse a aprobar leyes. Si es así, es muy probable que el marco legal solo quede en las palabras y no sea un apoyo verdadero. Por otro lado, es necesario, por no decir indispensable, considerar la realidad del sitio en donde se quiere usar el biogás como fuente de energía. Algunos de los aspectos que deben saberse incluyen nivel de conocimiento, estado de la infraestructura pública, presencia de la industria petrolera, etc. Cada lugar tendrá sus propias limitaciones respecto a la producción de biogás y conocerlas disminuirá la posibilidad del fracaso de proyectos, pues será claro cuáles son los problemas a resolver. También es importante considerar que el conocimiento teórico no es suficiente para instaurar una energía renovable a nivel de país. Para esto, son obligatorios los estudios a gran escala. Este análisis permitió deducir que México se comprometió con la bioenergía sin ser consciente de todas sus circunstancias, y esa es la razón por la que el biogás en el país esté paralizado ahora.

## Capítulo tercero

### Aciertos y errores aprendidos sobre el uso del biogás

Después de revisar diversos casos alrededor del mundo, es posible conocer qué se necesita y cuáles son los obstáculos para la implementación del biogás como fuente de energía. En otras palabras, este texto ha reunido los aciertos y errores que han tenido varios países al incluir, o intentar incluir, el biogás en su matriz energética. Esta compilación puede usarse para analizar qué tan posible y/o favorable es utilizar energía con biogás en un sitio específico, como lo es la ciudad de Quito, capital del Ecuador. Utilizando los resultados de la investigación previa, el presente capítulo dará herramientas para responder a la pregunta sobre el biogás como recurso energético en Quito. Para esto, se revisarán las enseñanzas de los casos estudiados y se identificarán aquellas más relevantes.

#### 1. Aprovechamiento energético del biogás: el mejor y peor de los casos

Una síntesis de los capítulos anteriores se puede encontrar en la Tabla 2. Las columnas muestran los casos estudiados con sus respectivas siglas de país: DE para Alemania, JP para Japón, US para Estados Unidos, BO para Bolivia, CO para Colombia y MX para México. Por otro lado, las filas contienen información sobre cada país. En las tres primeras filas, se pueden encontrar datos acerca del porcentaje de energía que cubre el biogás en cada país, el precio de esta fuente de energía, y qué materiales se utilizan para producir biogás mediante digestión anaerobia.

Las filas restantes muestran el conjunto de aspectos planteados en la descripción, historia y evaluación, las tres partes que conformaron el estudio de cada caso según lo establecido en la introducción. Estos aspectos se encuentran divididos en fortalezas y debilidades dentro de la tabla, separación que se realizó con base en el análisis realizado en este trabajo. La representación de la tabla indica que una x marcada en el cuadro significa que el caso correspondiente posee la fortaleza o debilidad especificada. Al observar la tabla, es posible notar que hay fortalezas, debilidades y países que destacan más que otros. Los siguientes párrafos discutirán cuáles son los países que destacan con el mayor número de fortalezas y el mayor número de debilidades.

Según lo indica la Tabla 2, Japón y México son casos que destacan. El primero, por poseer todas las fortalezas identificadas, mientras que el último presenta casi todas las debilidades establecidas.

Tabla 2  
Cuadro comparativo de fortalezas y debilidades del sector biogás en países analizados

		DE	JP	US	BO	CO	MX
	Porcentaje de energía con biogás en matriz energética	8%	2%	0,3%	-	0,03%	0,04%
	Precio de la energía con biogás (\$/kWh)	0,21	0,11	0,10	-	0,12	0,20
	Tipo de material utilizado para la producción de biogás	RA CE	AR RSU	AR RSU	RA	RA AR RSU	RA AR RSU
<b>Fortalezas</b>	Disponibilidad de la tecnología	x	x	x	x		
	Acceso prioritario a la red nacional de electricidad y/o de gas natural	x	x	x			
	Uso apropiado del digestato		x		x		
	Compromiso con la transición energética y/o mitigación del cambio climático	x	x			x	x
	Existencia de un marco legal	x	x			x	x
	Financiamiento (subsidijs del sector público, inversiones del sector privado, o donaciones internacionales)	x	x	x	x		
	Producción de biogás como parte de planes de desarrollo (rural, industrial, o de manejo sostenible de residuos)	x	x	x		x	
	Alianzas entre actores clave	x	x	x	x		
	Seguimiento apropiado	x	x	x			
<b>Debilidades</b>	Inexperiencia en el manejo de la tecnología					x	x
	Falta de cooperación entre actores					x	x
	Falta de aceptación del público por la tecnología	x		x	x		
	Políticas y medidas de apoyo inestables o inexistentes			x	x	x	x
	Falta de recursos financieros para cubrir el costo de inversión necesaria	x		x		x	x
	Proyectos no vinculados con la realidad del país						x
	Falta de infraestructura o fallas en la infraestructura					x	x
	Visión a futuro no sostenible	x	x				

RA = Residuos agrícolas. AR = Aguas residuales.

RSU = Residuos sólidos urbanos. CE = Cultivos energéticos

Fuentes: Witsch 2018, Álvarez y Ortiz 2016, IEA Bioenergy 2018, Ayoub y Yuji 2012, US EIA 2019, Wightman y Woodbury 2014, Contreras et al. 2020, Alzate et al. 2018, IB Tech 2020.

Elaboración propia, basado en el trabajo de Engdahl (2010)

Japón ha demostrado tener todo lo necesario para construir un sector del biogás fuerte. La isla posee la tecnología necesaria para realizar digestión anaerobia a gran escala, producir biogás y obtener electricidad a partir de él. Esta energía tiene acceso para alimentar a la red nacional. Además, todos los productos de la digestión anaerobia

son aprovechados en Japón. Si bien el digestato no puede usarse como fertilizante en los terrenos de la isla, este residuo es usado para generar más energía. Los aspectos mencionados en este párrafo pueden parecer simples, pero no se observaron en todos los casos analizados. La disponibilidad de la tecnología para producir biogás y aprovecharlo energéticamente es algo que Colombia y México no tienen. El acceso a la red nacional para la electricidad generada por biogás solo se reporta en los países industrializados. Y la investigación indica que, además de Japón, Bolivia es el único caso que maneja los residuos de la digestión anaerobia correctamente.

El éxito del biogás en Japón no solo se basa en la tecnología, sino también en las acciones políticas. Aunque sus razones no estén fundamentadas en la mitigación del cambio climático sino en la autosuficiencia, el compromiso de Japón con la transición energética es notable; se refleja en el apoyo del sector público para crear leyes que apoyan proyectos relacionados con obtener energía del biogás. El compromiso para cambiar sus fuentes tradicionales de energía y la existencia de un marco legal para lograrlo ponen a Japón por delante de Bolivia e incluso Estados Unidos. El sector público japonés también brinda su apoyo al biogás al otorgar financiamiento lo suficientemente abundante como para crear y mantener proyectos de energía con biogás, algo que no sucede en Colombia ni en México.

Las autoridades de la isla fueron conscientes de que, a pesar del apoyo con leyes y financiamiento, la implementación de la energía con biogás sería complicada de lograr por sí misma. Por eso, a diferencia de Bolivia y México, Japón enmarcó al biogás dentro de un plan más grande: su plan de manejo sostenible de residuos. Una vez resueltas todas las cuestiones administrativas, la isla se enfocó en cómo producir biogás. Para hacerlo, formó alianzas entre actores clave: el gobierno, la industria y la academia. Esta coalición permitió desarrollar tecnología, disponer de los medios para construirla y saber cómo manejarla. La ausencia de este tipo de alianzas dificulta la producción de biogás, como sucedió en Colombia y México.

Es posible pensar que, con todos estos temas cubiertos, ya se tiene asegurada una producción de biogás exitosa. Sin embargo, hay un factor decisivo para este éxito: el seguimiento apropiado. Japón, al igual que el resto de países industrializados en este estudio, se esforzó para acompañar el progreso de sus plantas de biogás y mejorarlo o mantenerlo. Este proceso de acompañamiento continuo no existió en Bolivia, Colombia y México quienes fallaron en este aspecto. Así, Japón ha logrado establecer el aprovechamiento energético de biogás en sus territorios hasta ahora.

México, por otro lado, cometió casi todos los errores identificables en su intento de usar el biogás como fuente de energía renovable. Para empezar, el país no cuenta con experiencia respecto a la tecnología de aprovechamiento energético del biogás. En México, la mayoría de este recurso es quemado sin que se aproveche su energía. Colombia se encuentra en una situación similar. Otra debilidad que presenta México es la falta de cooperación entre los actores involucrados en el tema del biogás. Como ya se mencionó antes, en México existe resistencia institucional. Es decir, la mayoría de las industrias mexicanas se benefician del petróleo y no quieren dejarlo. Por tanto, no hay ningún interés por parte del sector privado en apoyar al sector público con el tema de las energías renovables. En Colombia sucede lo mismo, pero es debido a que las industrias deben cubrir por completo los altos costos para construir plantas de biogás. Tampoco hay reportes de que el sector público mexicano se apoye con otro actor, como la academia o las organizaciones internacionales.

Además de la inexperiencia con la tecnología y la desunión entre actores, las leyes mexicanas también son un problema. México cuenta con un marco legal para la promoción del biogás en el país, pero este es inestable. Los únicos casos que muestran leyes estables son Alemania y Japón. Estados Unidos debe conformarse con normativas a escala de gobierno pequeño, Colombia tiene regulaciones que limitan la producción de biogás, y las leyes sobre biogás en Bolivia son inexistentes.

México también tiene como debilidad la falta de recursos financieros para construir y mantener proyectos de biogás. Esto también es un problema para Alemania, Estados Unidos y Colombia. Las razones son distintas para cada caso: Alemania no puede lograr que los precios del biogás bajen a pesar de los subsidios, Estados Unidos tiene que pagar para que sus instalaciones ya existentes puedan usar digestión anaerobia, y los empresarios colombianos no se arriesgan a invertir en tecnología del biogás. En México, la situación es más compleja. Producir biogás en los términos que han planteado implicaría mejorar el descuidado sistema de PTAR, mejora para la que no se tienen fondos. El hecho de que el Estado mexicano apoyara la producción del biogás sin tener en cuenta la situación de sus PTAR tiene que ver con la siguiente debilidad encontrada: la implementación no se hizo tomando en cuenta la realidad del país. En México, además del mal estado de las PTAR, se ignoraron: la falta de conocimiento sobre biogás gran escala, y la falta de incentivos apropiados en el marco legal.

El caso de México también presenta carencias en el aspecto técnico. La infraestructura mexicana no es la adecuada para producir biogás. Como ya se mencionó

antes, las PTAR en México son abundantes pero su estado es descuidado. El gobierno mexicano necesitaría invertir en primer lugar para arreglarlas, y luego para modificarlas de modo que produzcan biogás. A diferencia de Estados Unidos, las PTAR en México no representan una oportunidad para producir biogás. Estas instalaciones están en malas condiciones y bien podrían ser inexistentes, como en el caso de Colombia. Por todas estas razones, el sector del biogás en México es ineficiente y débil.

## **2. Factores esenciales para el uso del biogás como recurso energético**

Además del caso con más fortalezas y el caso que tiene más debilidades, la observación de la Tabla 2 también hace notorio cuáles son las fortalezas más frecuentes y debilidades menos frecuentes en todos los casos. Examinar cada una de ellas servirá para determinar aspectos necesarios y desafíos asequibles, es decir, qué es lo que se requiere obligatoriamente y qué es complicado pero superable a la hora de implementar la tecnología de la energía con biogás.

Dentro de las fortalezas más comunes, están el compromiso con una transición energética, ya sea para mitigación del cambio climático o no, y la existencia de leyes que apoyen proyectos relacionados con el biogás. Estas dos ventajas las comparten Alemania, Japón, Colombia y México. También están dentro de las fortalezas más comunes la disponibilidad de la tecnología, el financiamiento, y las alianzas entre actores clave, identificadas en Alemania, Japón, Estados Unidos y Bolivia. Además de eso, la mayoría de casos: Alemania, Japón, Estados Unidos y Colombia, han incorporado al biogás dentro de su planificación de desarrollo. Esto indica que las fortalezas comunes entre países que usan energía del biogás incluyen: aceptar la responsabilidad de cambiar la matriz energética, aprobar leyes que sustenten esa decisión, conseguir dinero y alianzas que hagan posibles los proyectos, y volverlos parte de un plan más grande.

Dentro de las debilidades identificadas, cuatro son poco frecuentes. La inexperiencia en el manejo de la tecnología, así como la falta de cooperación entre actores, se detectaron en Colombia y México. Los otros casos ya manejan la tecnología del biogás a un nivel aceptable, y construyeron las alianzas necesarias para sacar esta energía renovable adelante. También está el error de no tomar en cuenta la realidad del país, debilidad encontrada solo en México. El resto de casos sí analizó si el biogás era una alternativa adecuada para su país (Alemania, Japón y Colombia) o la adaptó a su

contexto para poder usarla (Estados Unidos y Bolivia). Finalmente, está la falta de infraestructura o fallas en la infraestructura. Colombia y México presentan este problema: el primer país no tiene la capacidad para construir plantas de biogás, y el último tiene instalaciones defectuosas a las que no se les puede hacer adaptaciones para digestión anaerobia.

Hay dos debilidades que no se observaron con frecuencia pero que no se pueden incluir en el análisis del párrafo anterior. La primera es la falta de aceptación del público por la tecnología, detectada en Alemania, Estados Unidos y Bolivia. No se puede concluir que los demás casos abordaron mejor este aspecto ya que el uso de biogás es aún una novedad en Colombia y México, y Japón debe esperar unos años para ver el resultado de las inversiones destinadas a apoyar a esta tecnología. Lo mismo se puede decir sobre la visión a futuro no sostenible, identificada solo en Alemania y Japón. Sería incorrecto decir que los otros cuatro países manejen mejor sus proyecciones a futuro, quizás ni siquiera las han considerado todavía. Por tanto, el análisis de estos dos aspectos solo es conveniente para casos con más experiencia en el uso del biogás.

### **3. Limitaciones para el biogás como recurso energético**

En la Tabla 2, también es posible ver cuáles son las fortalezas menos frecuentes y las debilidades más comunes entre todos los casos. Vale la pena mencionar estas en el capítulo, ya que pueden permitir identificar requisitos complejos y retos comunes para la implementación de la energía con biogás.

Las fortalezas menos frecuentes podrían considerarse como factores claves pero complicados para aumentar la probabilidad de éxito a la hora de implementar el uso del biogás como fuente de energía. Y esos factores son dos: un seguimiento apropiado y el acceso prioritario a la red de energía. Estas acciones solo las realizaron los casos de países industrializados: Alemania, Japón y Estados Unidos. Estos tres casos han logrado aprovechar la energía del biogás de manera relativamente exitosa, pues el biogás tiene un porcentaje significativo en sus matrices energéticas. Por tanto, este hallazgo sugiere que un proyecto energético de biogás debe ser inspeccionado durante el tiempo necesario y estar conectado a una red de distribución, para funcionar correctamente y ser productivo.

Otra fortaleza poco frecuente es el uso apropiado del digestato, hallada solo en Japón y Bolivia. Sin embargo, esta no podría considerarse un factor que aumente el

éxito de la implementación de la energía con biogás en un país. Más bien podría tratarse como un indicador para determinar si esta energía renovable realmente se está manejando de manera sostenible.

Por otro lado, las debilidades más frecuentes ayudan a identificar cuáles son los errores o desafíos más comunes respecto a la energía con biogás. En primer lugar, están las políticas inestables o inexistentes, identificadas en Estados Unidos, Bolivia, Colombia y México. Bolivia es el único caso sin normativa existente para el biogás, lo cual implica que fueron más frecuentes los casos con políticas inestables. Es decir, las normativas pueden volverse una limitación para el biogás si es que no están bien formuladas.

Otra debilidad frecuente es la falta de recursos financieros para los proyectos de biogás, hallada en Alemania, Estados Unidos, Colombia y México. Este problema es propio de la tecnología de biogás y digestión anaerobia, que tiene un alto costo de inversión y cuyo precio no han disminuido en comparación a otras energías renovables. Para profundizar en este aspecto, es necesario analizar la fila de precios de energía con biogás incluida en la Tabla 2.

Se observa que, de los seis casos, el costo para Alemania es el más alto: \$0,21 por kWh. No se espera que este precio baje, además de que mantenerlo estable requiere un gran esfuerzo por parte del país (Appun 2016, párr. 46; traducción propia). Esto pone al biogás alemán en desventaja frente a otras fuentes renovables que son más convenientes por su precio. Por ejemplo, alternativas como la energía solar y la eólica en Alemania cuestan \$0,13 y \$0,09 por cada kWh producido (Álvarez y Ortiz 2016, 96).

México estima un precio similar para su energía con biogás: \$0,20 por kWh hasta la década de 2030. Las proyecciones futuras respecto a este precio tampoco son favorables, pues se espera que suba a \$0,25/kWh en el 2040 (IB Tech 2020, 24). El aumento esperado de precio, sumado a las otras dificultades, complica aún más el uso energético del biogás en México.

Es notorio que los precios de Japón, Estados Unidos y Colombia son similares: \$0,11/kWh, \$0,10/kWh y \$0,12/kWh. Es probable que se deba al enfoque similar de los tres casos: no solo consideran la dimensión de energía sino también la de manejo de residuos. Los tres países mencionados usan biomasa residual o residuos orgánicos para la producción de su biogás. Por tanto, su aprovechamiento energético de este recurso tiene beneficios adicionales relacionados con el manejo de residuos. Se sugiere que esos beneficios extras son los que permiten que el precio se reduzca.

En el caso de Bolivia, no hay datos acerca del costo de la energía con biogás. Sin embargo, sí se conoce que el uso de biodigestores en áreas rurales beneficia la economía de las familias. La inversión necesaria para construir digestores está entre \$98 y \$122, recuperable en un máximo de 2 años (Acosta 2012, 13) debido a que la compra de kerosén, gasolina, diésel y velas ya no es necesaria. El ahorro que implica no hacer estas compras puede ir desde los \$68 hasta los \$114 al año (ONUDI y Energética 2013, 35), dinero que las familias en Bolivia rural pueden usar para suplir otras necesidades además de las energéticas.

Una vez descritas las debilidades y fortalezas para el uso energético del biogás, es posible contextualizar lo aprendido en el sitio de estudio: la ciudad de Quito.

## Capítulo cuarto

### Potencial y factibilidad de la energía con biogás en Quito

Este capítulo responde a la pregunta de investigación planteada en un inicio: ¿cuál es la factibilidad y las limitaciones técnicas y prácticas de obtener energía renovable a partir del biogás producido en la ciudad de Quito? Para hacerlo, primero se cuantificó la cantidad de biogás generado en Quito, a partir de su fuente más importante: el relleno sanitario El Inga. Esto permitió identificar las facilidades y obstáculos de tipo técnico que implican usar esta fuente de energía. Luego, se establecieron las mismas facilidades y obstáculos desde una perspectiva práctica, al analizar la situación del biogás en la ciudad. Finalmente, se usaron las fortalezas y debilidades obtenidas del capítulo anterior para ubicarlas en la realidad de la ciudad de Quito. Y así, se identificó qué es lo que Quito tiene y/o le hace falta para usar este recurso energético.

#### 1. Cantidad de biogás generado en Quito

Para saber si es posible aprovechar energéticamente el biogás producido en Quito, el primer paso es cuantificarlo y determinar la energía eléctrica que pueda producir. Como se mencionó en la introducción, el mayor emisor de  $\text{CH}_4$  (componente del biogás) en la ciudad de Quito es el sector Desperdicios. Y dentro de esta categoría, la mayor contribución de estos gases proviene de los residuos sólidos. Por tanto, se considera que la fuente más importante de biogás en la ciudad es el relleno sanitario El Inga, cuyas emisiones se calcularán en esta sección. La estimación de la cantidad de biogás que genera El Inga se realizó con el modelo LandGEM, diseñado por la entidad estadounidense EPA. Se trata de un software que calcula las emisiones gaseosas producidas en un relleno sanitario usando una ecuación de descomposición de primer orden (EPA 2005, 3).

El funcionamiento del modelo, así como los datos que se usaron para hacer los cálculos y realizar una estimación del biogás generado, se muestran en el anexo 1. Así, al ingresar toda la información requerida, fue posible hacer una simulación con el modelo LandGEM. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.

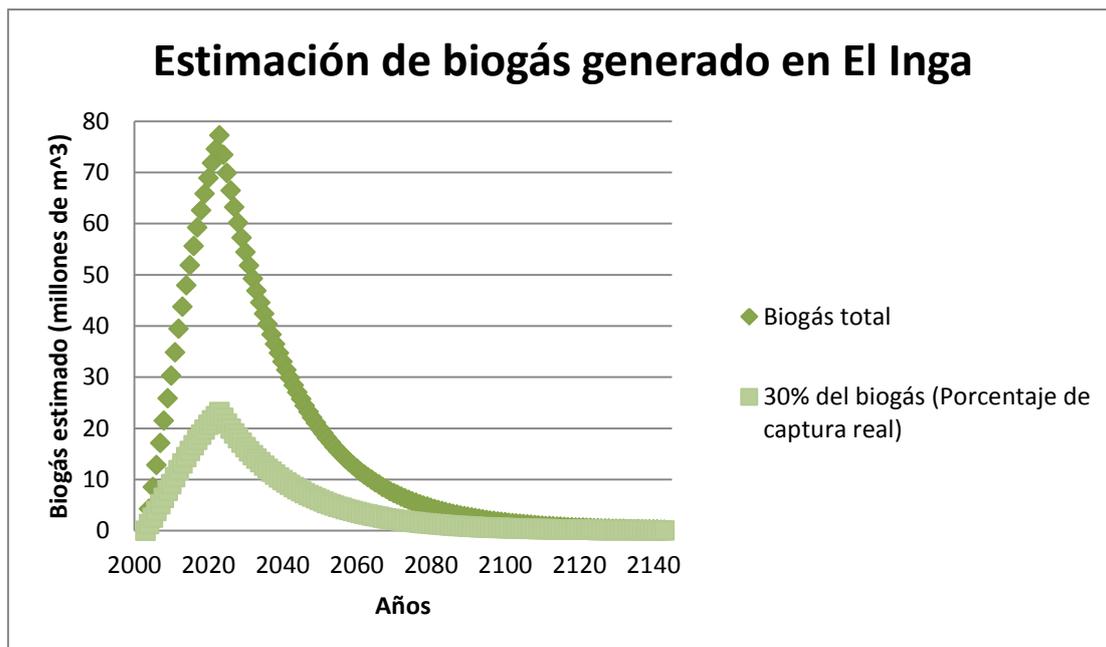


Figura 2. Gráfico de la estimación de biogás generado en el relleno sanitario de Quito por año  
Elaboración propia

En la Figura 2, los puntos verde oscuro representan la cantidad estimada total de biogás producida en el relleno sanitario El Inga a lo largo de los años. Los puntos verde claro representan el 30 % de esa cantidad estimada. Se eligió mostrar este segundo escenario porque se acerca más a la realidad, pues se reporta que solo se captura el 30 % del biogás producido en El Inga. (La Hora 2017, párr. 3). La diferencia entre ambos escenarios es visible, lo cual indica que se genera más biogás del que se captura.

En ambos escenarios, se observa que el relleno genera una cantidad creciente de biogás hasta llegar a un pico en 2023, produciéndose en ese punto 77 millones de metros cúbicos m<sup>3</sup> de biogás en total. Esto tiene sentido al saber que 2023 es el año proyectado para dejar de colocar residuos. Por tanto, a partir de ese año ya no habrá más material que se descomponga y produzca los gases. La figura también nos indica que el biogás se seguirá produciendo incluso décadas después del cierre del relleno. Es posible visualizar el biogás a largo plazo debido a que esta versión de LandGEM calcula las emisiones durante 140 años, a partir del año inicial de operación del relleno (EPA 2005, 7). En este caso, el año final de la simulación es 2143. El primer escenario del modelo proyecta que, para ese año, el relleno sanitario El Inga producirá cerca de 191 mil m<sup>3</sup> de biogás a pesar de llevar 120 años fuera de servicio.

Para representar el biogás estimado en términos energéticos, se transformarán los m<sup>3</sup> en energía usando un factor de conversión. Este factor se obtuvo de la literatura e indica que cada m<sup>3</sup> de biogás produce 2 kWh de electricidad (Hernández 2015, 19). La

electricidad que potencialmente podría generar el biogás del relleno sanitario El Inga a lo largo de los años se muestra en la Figura 3.

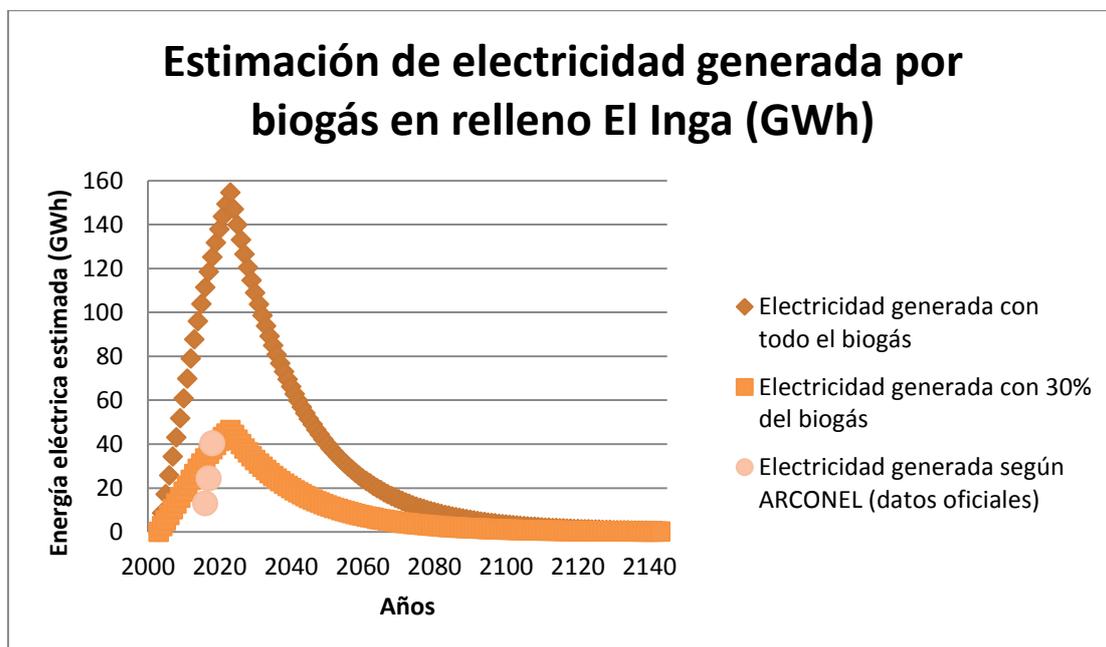


Figura 3. Gráfico de la estimación de electricidad generada cada año por el biogás del relleno sanitario El Inga  
Elaboración propia

La Figura 3 presenta los escenarios de electricidad generada con todo el biogás estimado y electricidad generada solo con el 30 % de ese biogás. En el primer escenario, se observa que el biogás en el relleno El Inga pudo haber generado una cantidad máxima de 154,5 GWh hasta el año proyectado para su cierre. Esta energía podría haber sido vendida a la red nacional o usada para consumo de la ciudad en alguna obra pública. Por ejemplo, los 154,5 GWh estimados para el 2023 podrían haberse usado para cubrir toda la demanda energética para el Metro de Quito, cuyas proyecciones de consumo son de 105 GWh por año (Arias et al. 2013, 24).

Después del año de cierre, ambos escenarios proyectan que el relleno generaría una cantidad variable de electricidad. Una estabilización es visible desde el 2100 según el gráfico, pero las cifras obtenidas con el modelo muestran que no es así: la electricidad no se estabiliza sino que continúa disminuyendo. Si bien la cantidad de biogás, y por ende de electricidad estimada, generada en El Inga varían a largo plazo, no se puede negar que se está desperdiciando un recurso energético. Según sugieren los datos, este relleno sanitario podría generar un máximo de 383 MWh al año aún 120 años después de su cierre.

Además de los escenarios, se han agregado a la Figura 3 datos oficiales de la electricidad producida en la planta del relleno sanitario El Inga. Estas cifras se obtuvieron de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad ARCONEL, e indican cuánta energía ha generado el biogás del relleno desde 2016. Es posible ver que esos puntos se acercan mucho al segundo escenario el cual, como ya se dijo antes, representa la situación real en El Inga respecto al porcentaje actual de captura de biogás.

A pesar de ser un modelo ampliamente usado para estos cálculos, LandGEM ignora algunas consideraciones importantes. Ya que está diseñado para evaluaciones, no considera aspectos específicos como la composición de residuos depositados o las condiciones de humedad en las que opera el relleno. Esos aspectos son determinantes en una ciudad como Quito, ubicada en un país tropical y cuyo porcentaje de residuos orgánicos es mayor al 50 %. Esta gran proporción de orgánicos generaría un biogás con alto contenido de vapor de agua, lo cual no es deseable. Al tener mucha humedad, el biogás posee menos poder calorífico y tiene limitaciones en su uso pues el agua puede dañar u oxidar las máquinas que lo transforman en electricidad (FAO 2011, 57; Hernández 2015, 19). Por tanto, además de las instalaciones típicas, el aprovechamiento energético del biogás en Quito necesitaría incluir un proceso de secado.

El potencial energético del biogás en Quito se calculó con el modelo LandGEM, del que se obtuvo las emisiones de biogás en El Inga, más el factor de conversión entre biogás y energía eléctrica. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento típico de un relleno sanitario. Además, las cifras muestran que el relleno podría generar 383 MWh incluso 120 años después de su cierre. Por tanto, se considera que no optar por el aprovechamiento energético de este biogás es un desperdicio de recursos. También se ha establecido que, debido a la composición de residuos de Quito, el aprovechamiento energético de biogás en El Inga requeriría de un proceso de secado. Es importante recordar que todo lo mencionado en esta sección solo ha analizado el aspecto teórico. La siguiente sección hablará sobre lo que implicaría el uso del biogás como fuente de energía en la capital del Ecuador, en el aspecto práctico.

## **2. Biogás en Quito: situación actual y perspectivas futuras**

Una vez que se han explorado las tecnicidades del aprovechamiento energético del biogás en Quito, es necesario observar la realidad de la ciudad. La investigación realizada en los dos primeros capítulos indica que considerar el contexto del lugar

dónde se desea implementar esta fuente de energía es un factor que define su éxito o fracaso. Por esa razón, la presente sección discutirá el estado actual de los proyectos de biogás en Quito y qué se espera en el futuro respecto a este tema.

El uso energético del biogás no es un tema nuevo para Quito, pero sí uno al cual no se le ha dado la importancia suficiente. La capital del Ecuador ha tenido varias experiencias con este tipo de proyectos, siendo el más importante la planta de captación de biogás en el relleno sanitario El Inga, pero éstos no han tenido éxito o relevancia debido a que no se han acoplado con planes de manejo de residuos.

En Quito, se han identificado tres proyectos de aprovechamiento energético de biogás: la planta de biogás del Jardín Botánico de Quito, el biodigestor del Camal Metropolitano, y la planta de generación eléctrica del relleno sanitario El Inga. En el Jardín Botánico de Quito, las instalaciones para captar biogás y transformarlo en energía tienen un fin principalmente educativo. Con esta planta, los visitantes del jardín pueden observar las etapas en las que los residuos vegetales, sobras de alimentos y desechos de caballos, se transforman en biogás (Chaguaro y López 2011, 8). Las cantidades generadas de este gas son pequeñas, y no se reporta que el Jardín Botánico lo use para cubrir sus necesidades energéticas. Lo que sí se conoce es que el biogás generado en su planta demostrativa se quema en una cocineta y en un generador eléctrico, como parte de la demostración para los visitantes (Chaguaro y López 2011, 12).

Otro proyecto similar en Quito es el biodigestor del Camal Metropolitano. A cargo de la Empresa Eléctrica Quito EEQ, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, y la Empresa Metropolitana de Rastro, este digestor se construyó para aprovechar los residuos producidos por el faenamiento de animales y evitar que terminen en cuerpos de agua o terrenos baldíos (El Comercio 2014, párrs. 1-3). Se planeaba usar la energía obtenida con el digestor para calentar agua que después sería utilizada en los procedimientos de limpieza de las instalaciones, logrando así sustituir el uso de gas licuado de petróleo en el proceso de calentamiento (Empresa Eléctrica Quito 2014, párr. 2). Sin embargo, no se han encontrado datos que determinen el desempeño de este digestor. Tampoco se ha repetido la experiencia en otros camales de la ciudad. Finalmente, el proyecto de aprovechamiento energético de biogás más conocido en Quito es la planta de generación eléctrica en el relleno sanitario El Inga.

Se reporta que la idea de construir una planta para transformar en electricidad el biogás del relleno sanitario de Quito estaba planificada desde 2008 (El Comercio 2016, párr.3). El proyecto comenzó con la instalación de un sistema para la captación de

biogás en El Inga, el cual funciona desde 2011 (Baca 2014, 18). No se han encontrado cifras oficiales sobre la cantidad o porcentaje de biogás del relleno que recoge el sistema cada año. El único dato relacionado se obtuvo del más reciente inventario de emisiones de GEI para Quito, el cual indica que la recolección de biogás en El Inga evitó que se emitieran 600 toneladas de CH<sub>4</sub> en 2011 (Baca 2014, 18). Es importante mencionar que la captación del biogás y su aprovechamiento energético no se dieron simultáneamente.

La planta generadora de electricidad con biogás comenzó a construirse en 2015, por lo que la combustión fue la forma de gestionar el gas producido en El Inga desde 2011 hasta 2016 (El Comercio 2016, párrs. 3 y 7). Finalmente, en 2017, la planta de electricidad en El Inga fue inaugurada de manera oficial (Emgirs 2018, párr. 1). Desde entonces, este relleno sanitario transforma el 30 % de su biogás en energía (La Hora 2017, párr. 3). Datos oficiales indican que este biogás llegó a generar 40,25 GWh de electricidad en 2018 (EC ARCONEL 2018, 189). La energía producida por el biogás del relleno no abastece a las oficinas en El Inga, sino que pasa al Sistema Nacional Interconectado SNI que es la red eléctrica de Ecuador (Machado 2020, párr. 17). En la actualidad, la planta generadora de electricidad está a cargo de la alianza público privada entre Gasgreen y Emgirs, pero está planeado que el manejo exclusivo lo tenga la Emgirs desde el 2028 (La Hora 2017, párr. 6). Como se puede notar, el proyecto más importante de energía a partir de biogás en Quito tiene algunos problemas de seguimiento pero está funcionando bien. Sin embargo, podría caer en un estancamiento o en el abandono al igual que el biodigestor del Camal Metropolitano, y por la misma razón: el proyecto se ideó sin ningún plan de manejo de residuos para la ciudad.

Este trabajo de investigación ha evidenciado que un sistema efectivo de energía con biogás debe estar acompañado de una gestión de residuos apropiada. Y lamentablemente, eso es algo que Quito no tiene. Los RSU producidos en Quito no son separados de ninguna manera. Si bien el informe anual para 2018 de la Emaseo, empresa a cargo de la recolección de basura, indica que se tomaron acciones para recoger solo residuos orgánicos, dichas acciones fueron incorporar dos micro-rutas sin haber diseñado antes una estrategia de manejo de orgánicos con la Secretaría de Ambiente o la Emgirs (Emaseo EP 2018, 9). Además, según las autoridades de la ciudad, el reciclaje en Quito es casi nulo. Datos de la Emgirs indican que “solo se recicla el 0,9 % de la basura que llega hasta [las] estaciones de transferencia” (Machado 2020, párr. 7). Esta cifra no toma en cuenta la labor de los recicladores informales o minadores, quienes buscan materiales reciclables en los contenedores de la ciudad.

También es importante mencionar que las aguas residuales domésticas de Quito, segundo emisor más importante de CH<sub>4</sub> dentro del sector Desperdicios de la ciudad, no están siendo manejadas de forma apropiada. Si bien existe una PTAR en Quito, esta trata 100 de los 7500 L/s de AR que genera la ciudad. Es decir, solo se remedia 1,3 % del caudal total de residuos líquidos producidos en la urbe.

Con escasas experiencias, la posibilidad de estancamiento del proyecto más importante de la ciudad, y la ausencia de un plan de manejo de residuos, la situación actual de Quito respecto al biogás es complicada. Y las proyecciones a futuro tampoco son muy buenas. Con la declaración del relleno sanitario El Inga en estado de emergencia, la falta de alianzas estratégicas, y el abandono de iniciativas de administraciones municipales anteriores, se pronostica un escaso o nulo avance en el aprovechamiento energético del biogás en Quito en un futuro.

El 23 de junio de 2020 se dio a conocer la noticia de que el relleno sanitario El Inga se había declarado en emergencia por decisión de la Emgirs (El Comercio 2020). Durante esas fechas, el sitio de disposición final de residuos de la ciudad presentaba dos importantes problemas que ya no podían ignorarse: el cierre del último cubeto disponible para ubicar residuos, y la acumulación de “líquidos producto de la descomposición de la basura” conocidos como lixiviados (El Comercio 2020, párr. 1). Sin un sitio definido para ubicar un nuevo relleno sanitario y con varias piscinas llenas de líquido contaminante, es bastante probable que el municipio no invierta en ampliar el proyecto de biogás en El Inga. Al menos durante un par de años, la alcaldía tendrá otras prioridades respecto al sector Desperdicios.

El futuro del biogás en Quito no solo podría verse truncado por la emergencia en el relleno sanitario, también por la inexistencia de alianzas necesarias para lograr que la tecnología del biogás avance. Una de las lecciones aprendidas en esta investigación fue que, en ausencia de apoyo por parte del gobierno, otros actores pueden cubrir ese vacío. A falta de leyes efectivas para apoyar a las energías renovables a nivel nacional y a nivel de municipio, la ciudad de Quito podría sacar adelante la tecnología del biogás con apoyo del sector privado o de la academia. Sin embargo, las autoridades parecen no estar interesadas en esa opción.

La postura oficial del gerente de la Emgirs sobre una solución a largo plazo para la crisis del sector Desperdicios es que se elaborará un plan de gestión de residuos con la Secretaría de Ambiente Quito y la Emaseo (El Comercio 2020, párr. 9) sin mencionar ninguna posible alianza con gestores privados. Respecto a las soluciones a corto plazo

para la acumulación de lixiviados, se conoce que las autoridades de Quito están buscando nuevas alianzas en lugar de aprovechar una que ya está establecida: entre GasGreen, quien maneja la captación de biogás y Emgirs, cuya competencia es solucionar el tema de los lixiviados. Pero ¿qué relación tienen el biogás y el tratamiento de lixiviados? Este interrogante fue respondido por Marcelo Arroyo, ingeniero químico, gerente de la empresa Valena Soluciones Ambientales, y experto en el tema del biogás, quien accedió a revisar este documento para validarlo. Según su experiencia, el lixiviado es la base para la producción de biogás, tanto para calidad como para flujo, pues tratar los lixiviados mejora la captación de biogás en un relleno sanitario. (Valena, comunicación personal). Por lo tanto, el tratamiento de lixiviados podría haberse enmarcado en la ampliación del proyecto ya establecido de la planta generadora de electricidad en El Inga, y desarrollarse bajo la alianza ya existente entre Emgirs y GasGreen. Lamentablemente, esto no fue posible pues GasGreen y Emgirs no trabajan juntos debido a problemas en el tema de inversiones (Valena, comunicación personal).

Además de los asuntos más urgentes y la indiferencia a formar alianzas con el sector privado, el biogás en Quito no puede avanzar debido a que las administraciones municipales actuales tienden a abandonar la obra realizada por sus predecesores. Se pueden mencionar dos ejemplos relacionados con el sector Desperdicios. En primer lugar, están los planes para separación de residuos propuestos por el ex alcalde Mauricio Rodas, los cuales fueron recolección diferenciada en los mercados de la ciudad, y una planta de separación en las estaciones de transferencia (donde van los residuos antes de ser depositados en el relleno sanitario). No se han encontrado documentos que reporten un seguimiento a estos proyectos por parte de la administración actual a cargo de Jorge Yunda, sucesor de Rodas. El segundo ejemplo son los planes de ampliar la generación de energía eléctrica en El Inga al duplicar la cantidad de biogás utilizada: de 30 % a 60 %, propuesta que también se hizo durante la administración de Rodas (La Hora 2017, párr. 4) pero que no ha sido mencionada hasta ahora en la alcaldía de Yunda.

La situación presente y perspectiva futura del aprovechamiento energético del biogás en Quito no son favorables. En la actualidad, Quito no posee experiencia con proyectos de biogás pues solo se reportan tres existentes y uno con éxito. Además, la ciudad ni siquiera posee un plan de manejo de residuos, un paso necesario para el uso de energía con biogás. Tampoco se puede decir que la ciudad podría implementar más proyectos de biogás en el futuro, pues el sector Desperdicios tiene preocupaciones más urgentes como el tratamiento de lixiviados acumulados y la necesidad de un nuevo

relleno sanitario. Además, hacen falta alianzas con otros actores y también la voluntad de realizar seguimiento a propuestas previas.

Una vez explorados los aspectos teóricos y prácticos del aprovechamiento energético de biogás en Quito, es necesario establecer cuáles son sus fortalezas y debilidades más importantes respecto a esta tecnología. Sin embargo, no sería correcto analizar a Quito del mismo modo en que se analizaron a los referentes mundiales del biogás. De modo que, en la sección siguiente, la ciudad en la que se enfoca este trabajo será estudiada de otra manera. Se tomarán en cuenta los hallazgos del capítulo anterior.

### **3. Fortalezas y debilidades para ampliar el uso de biogás en Quito**

Para completar este trabajo, se plantearán las ventajas y las limitaciones que posee la ciudad de Quito para implementar el biogás como fuente de energía, al igual que se hizo con los casos estudiados antes. Sin embargo, no se realizará de la misma manera. En lugar de referirse a todos los factores que determinan el éxito o fracaso del biogás, mencionados en la Tabla 2, solo se considerarán las fortalezas que se encontraron en la mayoría de los países estudiados y las debilidades poco usuales entre los casos. Las fortalezas más comunes y las debilidades menos comunes fueron establecidas en la sección 2 del capítulo tercero.

Las fortalezas más comunes encontradas en este estudio pueden considerarse como aspectos básicos para implementar el biogás como recurso energético. Son seis: disponibilidad de la tecnología, compromiso con la transición energética y/o mitigación del cambio climático, existencia de un marco legal, financiamiento, producción de biogás como parte de planes de desarrollo, y alianzas entre actores clave.

Actualmente, en la ciudad de Quito solo se registran tres proyectos de aprovechamiento energético de biogás. Y solo uno de ellos (planta generadora de electricidad en El Inga) está en funcionamiento. Por tanto, la ciudad no presenta disponibilidad de la tecnología.

El compromiso con la transición energética es un tema difícil de definir, no solo para Quito sino para Ecuador. Según se reporta, “Ecuador declaró como Política de Estado la adopción de medidas de adaptación y *mitigación* del cambio climático” desde el 2009 (Baca 2014, 4; énfasis añadido). Sin embargo, actualmente no hay ninguna ley ecuatoriana que apoye el uso de ninguna fuente de energía renovable. Tampoco existe ningún plan o proyecto que aborde esa línea.

Respecto a la existencia de leyes que apoyen y fomenten de manera activa el uso de biogás y/u otras formas de energía renovable, en la actualidad no existe ninguna en Quito ni a nivel nacional, como ya se mencionó antes.

No se puede argumentar sobre el aspecto de Financiamiento, pues es un tema que solo puede evaluarse en casos donde el uso del biogás está al menos encaminado. Y eso no sucede con la ciudad de Quito. Sin embargo, sí se puede mencionar que la planta de biogás en El Inga produce electricidad a un precio de \$0,15/kWh (Olmedo y Curillo 2019, 69). Este precio es alto dentro de la realidad de Ecuador donde, desde 2007, los consumidores domésticos pagan \$0,04/kWh por la electricidad (Romero y Jara 2020, 70). Por tanto, se puede sugerir que el aspecto de costos sería una limitación importante para invertir o siquiera considerar este tipo de proyectos.

La inclusión del biogás o de acciones que apoyen su producción, como la gestión sostenible de residuos, dentro de planes más grandes es algo que sí se ha dado en Quito pero con planteamientos flojos. A pesar de la existencia de intenciones, evidenciadas en documentos oficiales, para aplicar un manejo sostenible de residuos en la ciudad, se limitan a ser solo eso: intenciones. Para ilustrar esto, se tomaran como ejemplo los planes estratégicos de la Emaseo para el período 2016-2019 y para 2020-2023. Ambos establecen cumplir con las exigencias del Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2015-2025 (Emaseo EP 2016, 12; Emaseo EP 2019, 13). Sin embargo, tienen objetivos muy diferentes en su Plan Maestro de Gestión de Residuos. En el plan de 2016-2019, el concepto base era el de cero basura y uno de sus objetivos era “Incrementar la aplicación de mejores prácticas ambientales *con la participación pública, privada y comunitaria*” (Emaseo EP 2016, 37 y 50; énfasis añadido). Como todo plan, incluía estrategias para cumplir con el objetivo. Pero las estrategias asociadas al objetivo citado se plantearon con lo que se consideraría verbos de inacción: fomentar, promover, fortalecer (Emaseo EP 2016, 51). Existe una clara diferencia con los verbos usados en las estrategias para otros objetivos del plan, como capacitar, crear y publicar. De modo que las estrategias asociadas a residuos sólidos en Quito estaban débilmente planteadas, a tal extremo que no se mencionaron en el siguiente período. El plan de 2020-2023 cambió el objetivo relacionado con el manejo de residuos sólidos. Pasó a plantearse como “Incrementar *la cultura ciudadana* sobre el manejo responsable de los residuos sólidos” (Emaseo EP 2019, 34; énfasis añadido). Además de eso, el concepto de basura cero no se menciona en ninguna parte del documento. Por tanto, el manejo sostenible de residuos (una de las bases para la

producción de biogás) puede estar presente en algunos planes oficiales de la ciudad, pero tiene una propuesta tan débil que es sencillo ignorarla o no trabajar en ella.

Las alianzas entre actores clave son un aspecto complejo en Quito. Parece ser que la decisión de solicitar apoyo al sector privado para el tema Desperdicios depende del alcalde a cargo. En la administración anterior, la planta de generación eléctrica El Inga se construyó con apoyo de la empresa Gasgreen. Por otro lado, la información revisada sugiere que la administración actual acude a la empresa privada solo para soluciones de emergencia. El municipio no tiene planes de colaborar con la empresa privada para construir un plan de manejo de residuos, lo cual sería una solución a largo plazo para el sector Desperdicios. Sin embargo, sí realizó una “invitación masiva” para encontrar una empresa que se encargue del tratamiento de lixiviados en El Inga (El Comercio 2020, párr. 5), cuya acumulación es un problema que se agravó en 2020.

Al igual que las fortalezas más frecuentes, las debilidades menos frecuentes al implementar el uso del biogás también son de utilidad. Estas pueden servir para identificar aquellos factores posibles de superar, puesto que la mayoría de casos analizados lograron salir y no quedarse limitados por ellos. Se han identificado cuatro en total: inexperiencia con la tecnología, falta de cooperación entre actores, proyectos no vinculados con la realidad del sitio, y falta o fallas de infraestructura.

Como se mencionó antes, Quito solo ha tenido tres proyectos de aprovechamiento energético del biogás, y solamente uno era a gran escala. Por tanto, la ciudad todavía no posee experiencia respecto a esta tecnología.

En el caso de Quito, actualmente hay una clara ausencia de alianzas entre los actores de la ciudad. Las autoridades no buscan aliarse con el sector privado para solucionar problemas ambientales excepto cuando la situación ya es crítica, como sucede con la crisis del relleno sanitario El Inga.

La falta de vinculación con la realidad del sitio no es un aspecto que pueda abordarse para Quito, ya que solo es posible evaluarlo cuando hay proyectos existentes. Sin embargo, se puede argumentar que usar residuos orgánicos para generar biogás y luego electricidad es ideal para la ciudad. Esto requeriría separar los orgánicos del resto de basura, lo cual supone que los residuos vegetales y de alimentos no terminen en los cubetos del relleno sanitario. Los desechos orgánicos poseen una gran cantidad de humedad, la cual favorece la producción de lixiviados (Machado 2020, 15). Por tanto, al retirarlos, la humedad en los residuos enterrados sería menor, lo cual disminuiría los lixiviados generados. La acumulación de lixiviados es una de las razones por las que el

relleno sanitario El Inga está en situación de emergencia, así que el aprovechamiento energético del biogás generado por residuos orgánicos podría plantearse como la solución a largo plazo para esta crisis del sector Desperdicios en Quito.

Quizás la debilidad más evidente acerca del biogás en Quito sea la falta de infraestructura. La ciudad no posee instalaciones que puedan adaptarse para que realicen digestión anaerobia y produzcan biogás, como PTAR. A pesar de ser la ciudad más poblada del Ecuador, Quito solo cuenta con una de estas plantas, la cual no trata más del 1 % del volumen de AR producido a diario. Construir PTAR en Quito, con capacidad de tratar una mayor proporción del caudal de AR domésticas generadas, podría tener doble beneficio: se reduciría el impacto ambiental a los cuerpos hídricos en los que se depositan las AR sin tratar, y las instalaciones podrían adecuarse para generar biogás.

Después de analizar, en el contexto de Quito, los puntos básicos y las dificultades superables para implementar el uso del biogás, es posible identificar qué se debe hacer, qué necesita un cambio y qué no se puede controlar.

El aspecto prioritario que debe atender la ciudad si desea usar este recurso energético es la falta de cooperación entre actores. Es necesario establecer alianzas con el sector privado, pues es el actor que ayudó a establecer el proyecto de aprovechamiento energético de biogás más importante de la ciudad. Alianzas entre el sector privado y público generarían más proyectos, como el de la planta generadora en El Inga, con lo cual Quito obtendría mayor disponibilidad y más experiencia en el manejo de la tecnología del biogás.

Por otro lado, se deben hacer cambios respecto a la inclusión del biogás en planes para la ciudad y a la falta de infraestructura. Si se llega a plantear el biogás dentro de cualquier plan para Quito, las estrategias para cumplir los objetivos deben estar enfocadas a la acción. Del mismo modo, antes de plantear el uso del biogás, debe tratarse la problemática de la falta de PTAR en Quito, que complementa el primer tema.

Finalmente, el compromiso con la transición energética y el marco legal son aspectos más complejos y menos accesibles. En teoría, Ecuador ya asumió una responsabilidad en la lucha contra el cambio climático pero no la está cumpliendo. Del mismo modo, no existen leyes ecuatorianas vigentes que apoyen a las energías renovables. Estas fallas y carencias no se pueden solucionar a nivel de ciudad sino que es necesaria una intervención para todo el país. Por lo tanto, son dos cuestiones que deberían abordarse después.

## Conclusiones

El proceso de digestión anaerobia, a través del cual se produce biogás, es una de las opciones más completas entre las alternativas de energías renovables. El aprovechamiento energético de esta reacción química no solo evita que el CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> producidos por la descomposición de materia orgánica (generalmente residual) llegue a la atmósfera, también convierte esos GEI no emitidos en energía aprovechable para la población. Es decir, usar biogás como fuente de energía permite mitigar el cambio climático a través de una reducción directa de emisiones y, a la vez, brinda una opción para reemplazar a los combustibles fósiles. Muchos países ya han reconocido el gran potencial del biogás generado a partir de desechos orgánicos para reducir emisiones de GEI y como fuente de energía, y por eso han fomentado su uso, ya sea a nivel nacional o en áreas específicas. Sus experiencias son útiles lecciones para entender a profundidad el manejo, requerimientos y desafíos que implica el aprovechamiento energético de este recurso. Así, con base en ellas, se puede evaluar si un sitio específico tiene las condiciones necesarias para generar energía a partir de biogás. Eso es lo que este trabajo intentó hacer, al tomar lo aprendido de los seis casos analizados: Alemania, Japón, Estados Unidos, Bolivia, Colombia y México, y contrastar sus aspectos más relevantes con la ciudad de Quito.

La presente investigación ha demostrado los numerosos beneficios y oportunidades de usar biogás para generar electricidad y calor. Es una fuente de energía renovable, cuya producción y aprovechamiento está muy ligada al manejo sostenible de residuos. Japón y Estados Unidos apoyaron su uso bajo ese contexto. El biogás también está relacionado con el apoyo al sector rural y sus habitantes. Esto se observó en dos casos: Alemania, donde la electricidad a partir de biogás es producida por granjeros que tienen las instalaciones necesarias y la posibilidad de vender esa energía al Estado, y Bolivia, donde los digestores anaerobios domésticos mejoran las condiciones de vida de la gente que vive en el campo. Además de eso, el caso de Bolivia también mostró que el aprovechamiento energético de la digestión anaerobia es una tecnología con la capacidad de solucionar las desigualdades energéticas entre áreas urbanas y rurales. Los casos de Colombia y México presentaron poca experiencia con el uso del biogás para generar energía, pues se encuentran en etapas muy tempranas del proceso. Sin embargo, se sugiere que es una fuente de energía con mucho potencial por explotar, al menos en

Colombia. Este país cuenta con el apoyo de su gobierno para implementar energías renovables, además de disponer de una gran cantidad de biomasa agrícola residual y de condiciones ideales para la digestión anaerobia.

A pesar de las muchas ventajas y oportunidades del biogás, su producción y aprovechamiento energético a gran escala es complicado. Se necesitan leyes, incentivos, programas, financiamiento e infraestructura. Y si el sistema llega a implementarse de manera incorrecta, puede restarle al biogás todos sus aspectos positivos. Esta última conclusión la demuestra el caso de México, el cual vio el potencial del biogás y lo quiso incluir en su matriz energética. Sin embargo, las decisiones alrededor de esta fuente de energía se tomaron sin considerar la situación del país y limitando el papel del Estado a aprobar leyes. El resultado fue que el uso del biogás en México quedó estancado, sin perspectiva de crecimiento. Pero este no fue el único caso en el que se detectaron problemas respecto al biogás. Al analizar el caso de Colombia, se encontró que la escasa experiencia y crecimiento en el uso del biogás podría atribuirse a dos factores: las limitaciones de producción por normativas mal planteadas, y la falta de infraestructura debido a que los costos son altos y no tienen subsidio. Por otro lado, los casos de Bolivia y Estados Unidos tienen complicaciones en extender el uso del biogás a nivel nacional, debido a un existente rechazo hacia proyectos de biogás por parte de los ciudadanos, y a la falta de apoyo por parte de sus gobiernos centrales. Mientras que Alemania y Japón no presentan este problema de ausencia del Estado, se observó que estos dos casos están cayendo en una producción no sostenible del biogás, ya sea por sus prácticas actuales o por sus proyecciones a futuro. Actualmente, Alemania usa más cultivos energéticos que residuos agrícolas para alimentar sus digestores anaerobios. Y Japón ha establecido en sus planes venideros la intención de usar biomasa de bosques para impulsar la bioenergía en el país, categoría en la que entra el biogás.

Es importante mencionar que, según se encontró, cada país tuvo diferentes razones y está en diferentes etapas respecto al uso de energía con biogás.

Después de realizar el análisis de los seis casos, y plantear en una tabla todas las fortalezas y debilidades encontradas para implementar la energía con biogás, se abordó la pregunta de investigación ¿cuál es la factibilidad y las limitaciones técnicas y prácticas de obtener energía renovable a partir del biogás producido en la ciudad de Quito? En primer lugar, se analizó el aspecto técnico. Utilizando el modelo LandGEM y factores de conversión, se cuantificó cuánto biogás produce la fuente más importante de Quito: el relleno sanitario El Inga y qué cantidad de electricidad se podría producir con

su aprovechamiento energético. Los resultados obtenidos revelan que, aún 120 años después del cierre proyectado para el relleno, el flujo de biogás continuaría emitiéndose y sería suficiente para obtener hasta 383 MWh al año. Por tanto, el biogás generado en El Inga es un recurso energético no aprovechado. Además del cálculo realizado, se determinó que una limitación técnica importante para usar energía con biogás en Quito es la necesidad de un proceso de secado. La proporción mayoritaria de orgánicos que compone los residuos de la ciudad haría que la mezcla gaseosa tenga una cantidad excesiva de humedad, la cual necesita separarse antes del aprovechamiento energético.

Además de las cuestiones técnicas, también se analizó el aspecto práctico. La intención fue plantear la situación presente y proyección futura del biogás en Quito. Se encontró que la ciudad ha tenido en total tres proyectos de biogás, y solo uno de ellos ha tenido seguimiento y éxito: la planta generadora del relleno sanitario El Inga. Sin embargo, la planta no ha seguido su crecimiento proyectado. Esto indica que no hay experiencia con este tipo de tecnología y su manejo en Quito. De acuerdo a lo aprendido del análisis del sector biogás en los seis países mencionados, se sugiere que la razón detrás del fracaso y estancamiento en estos proyectos de biogás se deba a la falta de un plan de manejo de residuos para la ciudad. Respecto a escenarios futuros, la información sugiere que el crecimiento de la planta generadora El Inga no será una prioridad para las autoridades municipales. La actual crisis del desperdicio que afronta Quito tiene problemas más urgentes, como el manejo de lixiviados acumulados en el relleno sanitario El Inga. Esto se suma a la carencia de alianzas estratégicas para crear más proyectos de biogás, y a la tendencia que tienen las autoridades de Quito de no seguir ninguna línea de sus predecesores en favor de sus propuestas actuales.

Para terminar de responder la pregunta de investigación, se estableció qué debilidades y fortalezas posee la ciudad de Quito para implementar el uso de energía con biogás. No se consideraron todas las fortalezas y debilidades halladas en los seis casos analizados previamente, solo se tomaron en cuenta las fortalezas más comunes y las debilidades menos comunes. La razón para esto es que las fortalezas más comunes pueden considerarse como las condiciones necesarias o fundamentales que requiere un lugar para aprovechar energéticamente el biogás: disponibilidad de la tecnología, compromiso con la transición energética y/o mitigación del cambio climático, existencia de un marco legal, financiamiento, producción de biogás como parte de planes de desarrollo, y alianzas entre actores clave. Del mismo modo, las debilidades menos comunes pueden considerarse como aquellas dificultades que han existido al

implementar la energía con biogás, pero que se han podido superar, como la inexperiencia con la tecnología, la falta de cooperación entre actores, los proyectos no vinculados con la realidad del país, y la falta o fallas en la infraestructura.

Respecto a las fortalezas más comunes, Quito no posee disponibilidad de tecnología de digestión anaerobia y tampoco existen leyes municipales que fomenten el uso de energía renovable. El análisis del aspecto Financiamiento ha determinado que la energía generada por biogás en Quito es más costosa de producir que la energía eléctrica convencional a nivel nacional. El compromiso con la transición energética, la inclusión de la producción del biogás en planes más grandes, y las alianzas entre actores clave son temas interesantes de abordar. Si bien Quito sí las tiene, son fortalezas que presentan vacíos. Debido a que la adopción de medidas de adaptación y mitigación del cambio climático son política de Estado en Ecuador, la transición energética debería ser una prioridad al menos en su capital: Quito. Sin embargo, la falta de proyectos y leyes relacionados al tema indica que es un propósito solo en papel. Sucede algo similar con la producción de biogás dentro de planes más grandes. Acciones que podrían complementar el uso de esta fuente de energía, como un plan sostenible de manejo de residuos, sí se incluyen en documentos oficiales. Pero las estrategias para lograrlo se plantean de manera muy tibia. Finalmente, están las alianzas entre actores clave. Sí existen en Quito, pues la planta generadora El Inga fue construida y es manejada con la empresa privada GasGreen, y el municipio ha convocado a las empresas privadas para presentar sus propuestas sobre el manejo de lixiviados acumulados en el relleno sanitario. El problema es que estas alianzas solo se buscan en situaciones de emergencia o no están siendo aprovechadas. Según la opinión de un experto, Gasgreen, la empresa que maneja el biogás está en capacidad de ayudar al municipio con el tema de los lixiviados, pero esa colaboración no fue posible por temas de financiamiento.

Acerca de las debilidades menos comunes, Quito sí tiene inexperiencia con la tecnología, falta de cooperación entre actores, y falta de infraestructura para producir biogás y aprovecharlo energéticamente. La inexperiencia está ligada a la escasa cantidad de proyectos de biogás que tiene la ciudad. La falta de cooperación entre actores sucede debido a que las alianzas existentes entre sector público y privado no son fuertes o no se aprovechan. Una debilidad evidente es la falta de infraestructura para producir biogás en Quito. El análisis de casos en los primeros dos capítulos mostró que algunos países adaptaron sus PTAR para que realizaran digestión anaerobia y así producir biogás. Quito, a pesar de ser la ciudad más poblada del Ecuador, solo posee una PTAR que trata

un caudal pequeño. Por tanto, la construcción de más PTAR en la ciudad no solo aumentaría el volumen tratado de AR en Quito, también abriría la oportunidad a generar biogás y luego energía a partir de estos desechos líquidos. La última debilidad común es la falta de vinculación de proyectos de biogás con la realidad del país. Ya que no hay proyectos existentes para evaluar este aspecto, se ha determinado como inconcluyente. Sin embargo, sí se sugiere que un proyecto de aprovechamiento energético de biogás que use residuos orgánicos como materia prima sería una opción ideal para Quito. No solo por motivos de mitigación de cambio climático, el aprovechamiento energético del biogás también sería una solución a largo plazo para el problema de acumulación de lixiviados en el relleno sanitario.

Por tanto, para responder a la pregunta de investigación planteada, se puede decir que el uso energético de biogás en Quito se ve obstaculizado por sus limitaciones existentes. Se ha mostrado que el biogás producido en El Inga es un recurso energético que no está aprovechándose, pero las condiciones actuales no son favorables para su implementación en la ciudad. No hay infraestructura, disponibilidad, experiencia con la tecnología, o leyes que apoyen este tipo de proyectos. El costo de producción de energía con biogás es alto en relación a otras fuentes energéticas, y las alianzas existentes que podrían impulsar el uso energético del biogás no son aprovechadas. Además, el compromiso con la transición energética y los planes afines a la producción de biogás (como el manejo sostenible de residuos) son tomados muy a la ligera.

Además de responder a la pregunta de investigación, este trabajo intentó establecer cuáles son las problemáticas más urgentes a abordar si es que, en un futuro, la ciudad de Quito reconoce el potencial de la energía con biogás y busca usarla. Se sugiere que el aspecto más importante son las alianzas con actores clave, en este caso el sector privado, pues el proyecto energético de biogás más importante de la ciudad se construyó con una alianza público-privada. Además, será necesario contextualizar el uso del biogás como recurso energético dentro de un plan de manejo de residuos, un tema que Quito ha descuidado. La aprobación de leyes podría esperar, ya que esta investigación determinó que los marcos legales pueden ser limitantes si no están bien diseñados.

Se espera que este trabajo contribuya al conocimiento de la energía con biogás y plantee en los tomadores de decisiones la posibilidad de usar este recurso energético, desaprovechado en Quito. El uso energético del biogás en Quito no solo sería una estrategia de mitigación para el cambio climático, al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y

CH<sub>4</sub> que produce el relleno sanitario de la ciudad, también podría considerarse como una forma de adaptación para el sector energético ecuatoriano. Considerando la situación energética de nuestro país, la discusión sobre el biogás y otras formas de energía renovable es necesaria. Actualmente, Ecuador obtiene su electricidad a partir de hidroeléctricas. Este es un sistema con vulnerabilidades existentes que podrían aumentar ante el cambio climático, pues uno de los efectos del aumento de temperatura del planeta son las modificaciones de los ciclos hidrológicos. Para ilustrar la vulnerabilidad de las fuentes de energía ecuatorianas, se puede mencionar el derrumbe de la cascada San Rafael, que pone en posible peligro a la hidroeléctrica Coca Codos Sinclair. Por tanto, antes de que sus fuentes de energía se vean severamente afectadas, Ecuador debe considerar el uso de otros recursos energéticos. El biogás producido por residuos orgánicos podría ser uno de ellos.

## Lista de referencias

- Acosta, Fernando. 2012. “Anexo 2. Biogás y biocombustibles líquidos en comunidades rurales aisladas de América Latina: Caso 1: Biodigestores en zona alto andinas de Bolivia”. En *Guía de Sensibilización Biomasa y Desarrollo*, 5-20. Ciudad, Madrid, ES: Soluciones Prácticas / Energía sin Fronteras.
- Acosta, Melvin, y Jorgelina Pasqualino. 2014. “Potencial del Uso de Biogás en Colombia”. *Revista TEKNOS* 14 (2): 27-33.
- Alemán-Nava, Gibrán, Alexander Meneses, Diana Cárdenas, Rocío Díaz, Nicolae Scarlat, Jean Francois Dallemand, Nancy Ornelas, Roeb García, y Roberto Parra. 2014a. “Bioenergy in México: Status and perspective”. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 9 (1). doi: 10.1002/bbb.1523.
- Alemán-Nava, Gibrán, Luisaldo Sandate, Alexander Meneses, Rocío Díaz, Jean Francois Dellemand, y Roberto Parra. 2014b. “Bioenergy Sources and Representative Case Studies in México”. *Journal of Pretroleum & Environmental Biotechnology* 5 (4): 1-5. doi: 10.4172/2157-7463.1000190.
- Álvarez, Eloy, e Iñigo Ortiz. 2016. *La transición energética en Alemania (Energiewende)*. Orkestra Instituto Vasco de Competitividad.
- Alzate, Santiago, Álvaro Jaramillo, Fernando Villada, y Bonie Restrepo. 2018. “Assessment of Government Incentives for Energy from Waste in Colombia”. *Sustainability* 10 (4): 1-16. doi: 10.3390/su10041294.
- Andrade, Carolina, Andrea Corredor, Laura Buitrago, y Andrea Lache. 2017. “Procesos bioquímicos utilizados para la producción de bioetanol, biodiésel y biogás y su estado en Colombia”. *Semilleros Formación Investigativa* 3 (1): 101-17.
- Antoniou, Michael, Paulo Brack, Andrés Carrasco, John Fagan, Mohamed Ezz El-Din Mostafa Habib, Paulo Yoshio Kageyama, Carlo Leifert, Rubens Onofre Nodari, y Walter Pengue. 2010. *Soja transgénica: ¿sostenible? ¿responsable?* Vienna: GLS Bank.
- Appel, Franziska, Arlette Ostermeyer, y Alfons Balmann. 2016. “Effects of the German Renewable Energy Act on structural change in agriculture – The case of biogas”. *Utilities Policy* 41. doi: 10.1016/j.jup.2016.02.013.

- Appun, Kerstine. 2016. "Bioenergy – the troubled pillar of the Energiewende". *Clean Energy Wire*. 30 de septiembre. <https://www.cleanenergywire.org/dossiers/bioenergy-germany>
- Arias, Marcelo, Santiago Cañar, Xavier Segura, y Carlos Dávila. 2013. "Plan de Eficiencia Energética para el Ecuador 2013-2022". En *Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022*, 9-24. Quito, EC: CONELEC.
- Baca, Juan Carlos. 2014. *Inventario de Emisiones de Gases del Efecto de Invernadero. Sector Desperdicios – Año 2011*. Quito: Secretaría de Ambiente del DMQ.
- Beckman, John, y Oliver Campero. 2008. "Biogas at 4000 m above Sea Level: The pioneering work of *Tecnologías en Desarrollo*". *Pathways through an Eclectic Universe ASP Conference Series* 390: 543-6.
- Bodansky, Daniel, Jutta Bruneé, y Lavanya Rajamani. 2017. "Climate Governance beyond the United Nations Climate Regime". En *International Climate Change Law*, 258-94. Nueva York: Oxford University Press.
- Campero, Oliver. 2009. "Biogás en Bolivia Programa 'Viviendas autoenergéticas' una nueva forma de ver el futuro energético-ambiental del país, en área rural". *Revista Desarrollo Local Sostenible DELOS* 2 (4): 1-8.
- Castells, Xavier. 2012. "Biomasa y bioenergía". En *Energía, agua, medio ambiente, territorialidad y sostenibilidad*, 741-878. Madrid, ES: Ediciones Díaz de Santos.
- Chaguaro, Darío, y Washington López. 2011. "Diseño e implementación de un sistema de control y automatización para la planta de biogás del Jardín Botánico de Quito". Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4100>
- Cheng, Jay. 2017. *Biomass to Renewable Energy Processes*. CRC Press.
- Contreras, Michel, Rodrigo Sequeda, Jorlany Zapata, Marley Vanegas, y Alberto Albis. 2020. "A Look to the Biogas Generation from Organic Wastes in Colombia". *International Journal of Energy Economics and Policy* 10 (5): 248-54. doi: 10.32479/ijeep.9639.
- Dahl, Richard. 2015. "A Second Life For Scraps: Making Biogas From Food Waste". *Environmental Health Perspectives* 123 (7). doi: 10.1289/ehp.123-A180.
- Daniel-Gromke, Jaqueline, Nadja Rensberg, Velina Denysenko, Water Stinner, Tina Schmalfub, Mattes Scheftelowitz, Michael Nelles, y Jan Liebetrau. 2017. "Current Developments in Production and Utilization of Biogas and Biomethane in Germany". *Chemie Ingenieur Technik* 90. doi: 10.1002/cite.201700077.

- Dawson, LJ. 2019. “How Cities Are Turning Food Into Fuel”. *Politico Magazine*. 21 de noviembre. <https://www.politico.com/news/magazine/2019/11/21/food-waste-fuel-energy-sustainability-070265>
- Descola, Philippe. 2001. *Antropología de la naturaleza*. Lima: Instituto Francés de Estudios Andinos.
- EC ARCONEL. 2018. “Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano”. *Agencia de Regulación y Control de Electricidad*. <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/boletines-estadisticos/>
- EC Emaseo EP. 2016. “Plan Estratégico 2016 – 2019. Emaseo EP hacia el 2025”. *Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito*. 7 de octubre. [http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Plan\\_Estrategico\\_2016-2019\\_Aprobado\\_GG.pdf](http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Plan_Estrategico_2016-2019_Aprobado_GG.pdf).
- . 2018. “Informe de Gestión Anual”. *Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito*. Diciembre. [http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/rendicion\\_2018/5\\_Informe\\_Gestion\\_2018.pdf](http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/rendicion_2018/5_Informe_Gestion_2018.pdf)
- . 2019. “Plan Estratégico Emaseo EP 2020-2023”. *Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito*. 10 de enero. [http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/2020/Plan\\_Estrategico\\_EMASEO\\_EP\\_2020-2023.pdf](http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/2020/Plan_Estrategico_EMASEO_EP_2020-2023.pdf)
- EC Emgirs. 2018. “120 megavatios diarios de energía eléctrica se producen con el biogás del relleno sanitario”. *Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. 16 de marzo. <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/noticiasep/432-120-megavatios-diarios-de-energia-electrica-se-producen-con-el-biogas-del-relleno-sanitario>
- . 2019. “Caracterización de residuos sólidos urbanos”. *Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Accedido 19 de enero de 2020. <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zenkit/visitas-al-relleno-sanitario-2>
- Edahiro, Junko. 2012. “Japan’s Feed-in-Tariff Scheme Kicks Off!”. *Japan for Sustainability*. Julio. [https://www.japanfs.org/en/news/archives/news\\_id032133.html#:~:text=A%20feed%20Din%20Dtariff%20\(,and%20at%20pre%20Ddetermined%20prices](https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id032133.html#:~:text=A%20feed%20Din%20Dtariff%20(,and%20at%20pre%20Ddetermined%20prices).

- El Comercio. 2014. “Desechos orgánicos se transforman en energía y fertilizante”. *El Comercio*. 4 de febrero. [https://www.elcomercio.com/app\\_public.php/actualidad/ecuador/desechos-organicos-se-transforman-energia.html](https://www.elcomercio.com/app_public.php/actualidad/ecuador/desechos-organicos-se-transforman-energia.html)
- . 2016. “El gas de la basura se transforma en energía”. *El Comercio*. 15 de febrero. <https://www.elcomercio.com/actualidad/gas-basura-energia-elinga-quito.html>
- . 2020. “Emgirs declara la emergencia en relleno sanitario de El Inga; operadores se encargarán de construir otro cubeto y del tratamiento de lixiviados”. *El Comercio*. 24 de junio. <https://www.elcomercio.com/actualidad/emgirs-emergencia-relleno-sanitario-inga.html>.
- Empresa Eléctrica Quito. 2014. “EEQ construye biodigestor en el camal para aprovechar sus desechos”. *Prensa Quito*. 27 de enero. [http://www.prensa.quito.gob.ec/m/index.php?module=Noticias&func=news\\_user\\_view&id=10679&umt=EEQ%20construye%20biodigestor%20en%20el%20camal%20para%20aprovechar%20sus%20desechos](http://www.prensa.quito.gob.ec/m/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=10679&umt=EEQ%20construye%20biodigestor%20en%20el%20camal%20para%20aprovechar%20sus%20desechos).
- Engdahl, Kristina. 2010. “Biogas policies, incentives and barriers – a survey of the strategies of three European countries”. Tesis de maestría, Lund University. <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4468127>
- EPA. 2005. “Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User’s Guide”. *United States Environmental Protection Agency*.
- FAO. 2008. *Bosques y energía. Cuestiones clave*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- . 2011. “Usos del biogás”. En *Manual de Biogás*, 53-66. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32.
- Galán, Xando. 2016. “Potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia”. Monografía de especialización. Fundación Universidad de América. Bogotá D.C. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/637>.
- García, Carlos, y Omar Masera. 2016. *Estado del arte de la bioenergía en México*. Guadalajara: Imagia Comunicación.
- García, Luciana, y Juan Wahren. 2016. “Seguridad Alimentaria vs. Soberanía Alimentaria: La cuestión alimentaria y el modelo del agronegocio en la

- Argentina”. *Trabajo y sociedad – Núcleo Básico de Revistas científicas de Argentina* 26: 327-40.
- Garfí, Marianna, Jaime Martí-Herrero, Anna Garwood, y Ivet Ferrer. 2016. “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 599-614. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.071.
- Godoy, Emilio. 2020. “Bioenergía, el patito feo de la transición energética de México”. *Inter Press Service*. 8 de abril. <http://www.ipsnoticias.net/2020/04/bioenergia-patito-feo-la-transicion-energetica-mexico/>
- Goh, Chun Sheng, Takanobu Aikawa, Amanda Ahl, Kanae Ito, Chihiro Kayo, Yanosuri Kikuchi, Yasuo Takahashi, Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata, Yuichiro Kanematsu, Osamu Saito, y Yoshiki Yamagata. 2019. “Rethinking sustainable bioenergy development in Japan: decentralised system supported by local forestry biomass”. *Sustainability Science*. doi: 10.1007/s11625-019-00734-4.
- GTCCJ. 2017. *Estudio sociedad y energía en Bolivia*. GTCCJ. <https://ccjusticiabolivia.org/wp-content/uploads/2018/12/GTCCJ-Estudio-Sociedad-y-Energ%C3%ADa-en-Bolivia-Agenda-Trinacional-y-Misereor.pdf>.
- Gutiérrez, Juan Pablo. 2018. *Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030*. Morelia: Red Mexicana de Bioenergía A. C. / Red Temática de Bioenergía de CONACYT.
- Hadi, Andante, Premakumara Jagath, Chen Liu, Michael Knaus, Hiroshi Onoda, Faezeh Mahichi, y Yanghui Guo. 2019. “Challenges and An Implementation Framework for Sustainable Municipal Organic Waste Management Using Biogas Technology in Emerging Asian Countries”. *Sustainability* 11: 1-28. doi: 10.3390/su11226331.
- Hernández, Inty, Lilia Montañez, Adriana López, Antonio Rodríguez, Suresh Kumar, y Nagamani Balagurusamy. 2017. “Avances, retos y perspectivas de bioenergía en México” En *Perspectivas de Sustentabilidad en México*, 69-81. Madrid, ES: Editorial CIEMAT.
- Hernández, Francisco. 2015. “Introducción a los sistemas de biogás”. En *Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial*, 7-20.
- Hooks, Carl. 2017. “Managing Sludge Mountains: What Beijing Can Learn From Brooklyn”. *New Security Beat*. 7 de septiembre.

- <https://www.newsecuritybeat.org/2017/09/managing-sludge-mountains-beijing-learn-brooklyn/>
- IB Tech. 2020. *Biogás en México: Lecciones aprendidas de los proyectos de cooperación 2018-2019*. EA Energy Analyses. [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications\\_reports\\_papers/lecciones\\_aprendidas\\_esp.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/Publications_reports_papers/lecciones_aprendidas_esp.pdf)
- IEA Bioenergy. 2018. “Japan – 2018 update: Bioenergy policies and status of implementation”. IEA *Bioenergy*. Septiembre. [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/10/CountryReport2018\\_Japan\\_final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/10/CountryReport2018_Japan_final.pdf)
- Ingersoll, John. 2010. “Biomethane Feedstocks”. En *Biomethane*, 38-47. Bloomington, US: Xlibris Corporation.
- Iwai, Noriko, y Kuniaki Shishido. 2015. “The Impact of the Great East Japan Earthquake and Fukushima Daiichi Nuclear Accident on People’s Perception of Disaster Risks and Attitudes Toward Nuclear Energy Policy”. *Asian Journal for Public Opinion Research* 2 (3): 172-95. doi: 10.15206/ajpor.2015.2.3.172.
- JPN Agency for Natural Resources and Energy. 2017. “JAPAN’S ENERGY: 20 Questions to understand the current energy situation”. *Ministry of Economy, Trade and Industry*. Accedido 26 de agosto. [https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/brochures/pdf/japan\\_energy\\_2017.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/brochures/pdf/japan_energy_2017.pdf)
- Kang, Seungwoo, Sandrine Selosse, y Nadia Maizi. 2015. “Strategy of bioenergy development in the largest energy consumers of Asia (China, India, Japan and South Korea)”. *Energy Strategy Reviews* 8: 56-65. doi: 10.1016/j.esr.2015.09.003.
- Kojima, Takatoshi. 2012. “How is 100% Renewable Energy Possible in Japan by 2020?”. *Global Energy Network Institute*. Agosto. [http://www.geni.org/globalenergy/research/renewable-energy-potential-of-japan/renewable\\_energy\\_potential\\_of\\_Japan\\_by\\_2020.pdf](http://www.geni.org/globalenergy/research/renewable-energy-potential-of-japan/renewable_energy_potential_of_Japan_by_2020.pdf)
- Kranert, Martin, Sigrid Kusch, Jingjing Huang, y Klaus Fischer. 2012. “Anaerobic Digestion of Waste”. En *Waste to Energy: Opportunities and Challenges for Developing and Transition Economies*, editado por Avraam Karagiannidis, 107-35. Salónica: Springer.

- Kurashige, Yasuhiko. 2004. "Biomass Nippon Strategy in Japan – Why 'Biomass Nippon' Now". En *Biomass and Agriculture: Sustainability, markets and policies*, 559-64. OECD.
- La Hora. 2017. "La basura aporta energía eléctrica a Quito". *La Hora*. 17 de octubre. <https://lahora.com.ec/quito/noticia/1102107629/la-basura-ahora-aporta-energia-electrica-a-quito>
- Lebuhn, Michael, Bernhard Munk, y Mathias Effenberger. 2014. "Agricultural biogas production in Germany – from practice to microbiology basics". *Energy, Sustainability and Society* 4. doi: 10.1186/2192-0567-4-10.
- Li, Yu-You, y Takuro Kobayashi. 2010. "Chapter 3: Applications and New Developments of Biogas Technology in Japan". En *Environmental Anaerobic Technology: Applications and New Developments*, editado por Herbert H P Fang, 35-58. Londres, GB: Imperial College Press.
- Lönnqvist, Tomas, Thomas Sandberg, Juan Cristóbal Birbuet, Jesper Olsson, Cecilia Espinosa, Eva Thorin, Stefan Grönkvist, y María Gómez. 2018. "Large-scale biogas generation in Bolivia – A stepwise reconfiguration". *Journal of Cleaner Production* 180: 494-504. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.174.
- Machado, Jonathan. 2020. "Conozca la ruta de las 2.200 toneladas diarias de basura producidas en Quito". *Primicias*. 20 de febrero. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/conozca-ruta-basura-quito/>
- Maciejczyk, Manuel. 2017. "Situación del biogás en Alemania". *Fachverband Biogas*. 8-9 de noviembre. [https://4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/1-BiogasContextinGermany\\_Maciejczyk\\_ES.pdf](https://4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2017/11/1-BiogasContextinGermany_Maciejczyk_ES.pdf)
- Martí Herrero, Jaime. 2007. "Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia". *Livestock Research for Rural Development* 19 (12).
- . 2013. "Bolivia. Los biodigestores para reducir la pobreza energética e incrementar la producción agropecuaria sustentable". *CIMNE*. 7 de octubre. <http://www.ideassonline.org/public/pdf/BiodigestoresBoliviaESP.pdf>
- . 2019. *Experiencias Latinoamericanas en la implementación de estrategias para democratizar los biodigestores entre pequeños y medianos productores agropecuarios: Aportes a Ecuador*. Climate Technology Centre and Network (CTCN)-UNFCCC.

- Matsumura, Yukihiro. 2004. "The Possibility of Agricultural Biomass Utilization in Japan". En *Biomass and Agriculture: Sustainability, markets and policies*, 129-38. OECD.
- McGeehan, Luke. 2013. "Throwing Out the Trash: Waste to Energy In New York City An Analysis of Environmental Justice and NIMBY Concerns". Tesis de posgrado. Columbia University.
- Molina, Mario, José Sarukhán, y Julia Carabias. 2017. *El cambio climático. Causas, efectos y soluciones*. México: FCE, SEP, Conacyt.
- Moomaw, William, Francis Yamba, Masayuki Kamimoto, Lourdes Maurice, John Nyboer, Kevin Urama, y Tony Weir. 2011. "Introduction". En *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, 161-208. Nueva York: Cambridge University Press.
- NL Agency. 2013. *Biomass Opportunities in Colombia*. Utrecht: Netherlands Programmes for Sustainable Biomass.
- Nogués, Fernando, Daniel García-Galindo, y Adeline Rezeau, coord. 2010. *Energía de la biomasa*. Zaragoza, ES: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Nowlin, Matthew. 2019. *Environmental Policymaking in an Era of Climate Change*. Nueva York: Routledge.
- Olmedo, Jonathan y Jonnathan Curillo. 2019. "Proyecto técnico con enfoque general: Valoración de la producción de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala". Trabajo de titulación de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18166>
- ONUDI, y Energética. 2013. *Cambio Climático, Agua y Energía en Bolivia*. Energética. <http://www.energetica.org.bo/energetica/pdf/publicaciones/CCAEB2013.pdf>
- Pazmiño, Katya. 2016. "Biodigestores una solución energética para la población rural. Uso del biogás en un caso de estudio". Tesis de maestría. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Sede Ecuador. <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/xmlui/handle/10469/9651>
- Pérez, Rafael, y Ram Acharya. 2015. "Are Latin American and Caribbean Biofuel Policies Consistent with their Comparative Advantages?". Ponencia presentada en la reunión anual de la Southern Agricultural Economics Association, Atlanta, 31 de enero a 3 de febrero.

- Ramírez, Tania, Ojilve Medrado, y Luis Escobedo-Cazán. 2020. "Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El caso de la PTAR zona noroeste, Villahermosa, México". *enerLAC: Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe* 4 (1): 12-30.
- Rico, Javier. 2019. "Solo se aprovecha el dos por ciento del potencial mundial de producción de biogás" *Energías renovables: El periodismo de las energías limpias*. 17 de julio de 2019.
- Rivadeneira, Laura. 2016. "Caracterización y análisis del funcionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga". Tesis de pregrado. Universidad San Francisco de Quito. <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5774/1/124757.pdf>
- Romero, Israel y Darwin Jara. 2020. "Proyecto técnico con enfoque investigativo: Identificación de las barreras que obstaculizan la expansión de la energía eólica y solar fotovoltaica como fuentes de generación eléctrica en el Ecuador". Trabajo de titulación de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18735>
- Rueb, Emily. 2017. "How New York Is Turning Food Waste Into Compost and Gas". *The New York Times*. 2 de junio. <https://www.nytimes.com/2017/06/02/nyregion/compost-organic-recycling-new-york-city.html>
- Ruiz, Héctor, Alfredo Martínez, y Wilfred Vermerris. 2016. "Bioenergy Potential, Energy Crops, and Biofuel Production in Mexico". *Bioenergy Research* 9 (4): 981-4. doi: 10.1007/s12155-016-9802-7.
- Saito, Takashi. 2016. "A survey of research on the theoretical economic approach to waste and recycling". En *The Economics of Waste Management in East Asia*, editado por Masashi Yamamoto y Eiji Hosoda, 38-53. Nueva York: Routledge.
- Scarlat, Nicolae, Jean Francois Dallemand, y Fernando Fahl. 2018. "Biogas: Developments and perspectives in Europe". *Renewable Energy* 129: 457-72. doi: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- Silva, Jorge. 2019. "Energía renovable en México: Retos y oportunidades". *Revista Espacios* 40 (25): 1-15.
- Spellman, Frank. 2014. *Environmental Impacts of Renewable Energy*. New York: CRC Press.

- Sylvan, Derek. 2017. "Municipal Solid Waste in New York City: An Economic and Environmental Analysis of Disposal Options". *New York League of Conservation Voters Education Fund (NYLCVEF)*. <https://nylcvef.org/wp-content/uploads/2017/08/Solid-Waste-Background-Paper.pdf>
- Teotia, Mayank. 2013. "Managing New York City Municipal Solid Waste – Using Anaerobic Digestion". Tesis de posgrado. Pratt Institute, School of Architecture.
- Theuerl, Sussane, Christiane Herrmann, Monika Heiermann, Philipp Grundmann, Niels Landwehr, Ulrich Kreidenweis, y Annette Prochnow. 2019. "The Future Agricultural Biogas Plant in Germany: A Vision". *Energies* 12: 1-32. doi: 10.3390/en12030396.
- Tron, Fabián. 2011. "La gestión de residuos sólidos en Tokio, París, Madrid y México". *Cuadernos de Investigación Urbanística* 75: 1-109.
- US EIA Energy Information Administration. 2019. "Biomass explained: Landfill gas and biogas". *EIA*. Accedido 28 de agosto. <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/landfill-gas-and-biogas.php>
- Whiting, Kate. 2019. "The Japanese have a word to help them be less wasteful – 'mottainai'". *World Economic Forum*. 16 de agosto. <https://www.weforum.org/agenda/2019/08/the-japanese-have-a-word-to-help-them-be-less-wasteful-mottainai/>
- Witsch, Kathrin. 2018. "As subsidies are phased out, biogas farmers fight to survive". *Handelsblatt Today*. 23 de diciembre. <https://www.handelsblatt.com/english/companies/lower-energy-as-subsidies-are-phased-out-biogas-farmers-fight-to-survive/23733946.html?ticket=ST-4436039-19q0Af77x5b7K59RdEFU-ap4>
- Yokohama, Shinya, y Yukihiro Matsumura. 2015. "The Present Status and Future Scope of Bioenergy in Japan". *Journal of the Japan Institute of Energy* 94 (10): 1079-86.
- Zurita, Álvaro. 2016. "Experiencia alemana en el aprovechamiento energético de residuos municipales". *GIZ*. 8 de febrero. <http://www.proyectomesoamerica.org:8088/emsadocumentos/Capacitaciones/ForoTecCDMX/Bloque%20III.%20Experiencia%20alemana%20en%20el%20aprovechamiento%20energetico%20de%20residuos%20municipales%20-%20Alvaro%20Zurita%20GIZ.pdf>

## Anexos

### **Anexo 1: Metodología de la investigación (Tabla comparativa y Modelo LandGEM)**

#### Elaboración de la tabla comparativa de casos analizados

La tabla comparativa mostrada en la página 62 de este estudio se basó en las tablas del estudio realizado por Kristina Engdahl, citado en la bibliografía.

El objetivo de Engdahl fue comparar el desarrollo de la producción de biogás en tres países europeos: Suecia, Alemania y España. Para hacerlo, su metodología fue la siguiente. Realizó una revisión bibliográfica y entrevistó a expertos en el tema. Así lo hizo para cada país. Después, a partir de la información obtenida, Engdahl identificó incentivos y barreras para el desarrollo del biogás. Estos fueron redactados originalmente por la misma autora. Los incentivos y barreras fueron colocados en las filas de una tabla, junto con los países ubicados en columnas. La existencia de un incentivo o barrera se ilustraba con una X en la celda donde coincidían fila y columna.

Del mismo modo, esta investigación realizó una revisión bibliográfica sobre el uso energético del biogás en los seis países escogidos: Alemania, Japón, Estados Unidos, Bolivia, Colombia y México. A partir de ello, se identificaron fortalezas y debilidades para el biogás como fuente de energía. Para resumir los hallazgos obtenidos, las fortalezas y debilidades se redactaron y se colocaron en una tabla, junto con los países analizados. El resultado fue la Tabla 2.

Para la revisión bibliográfica de los países analizados en este trabajo, que permitió construir la tabla mencionada, se obtuvo información de documentos oficiales y/o traducciones disponibles de cada país, artículos indexados, trabajos académicos y notas de prensa.

#### Modelo de emisiones LandGEM

Para el cálculo de emisiones de biogás producidas por el relleno sanitario El Inga, ubicado en la ciudad de Quito, mencionado en la página 69, se usó la herramienta de estimación LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) Versión 3.02.

El software de LandGEM se compone de 9 hojas Excel. Para sus cálculos, el modelo usa una ecuación de primer orden. Esta expresa la tasa de descomposición de residuos en un relleno sanitario, y se muestra a continuación:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{i,j}}$$

En donde:

$Q_{CH_4}$  = generación anual de metano en el año calculado ( $m^3/año$ )

$i$  = incremento de tiempo en 1 año

$n$  = año del cálculo – año que se empezó a recibir residuos

$j$  = incremento de tiempo en 0.1 años

$k$  = tasa de generación de metano ( $año^{-1}$ )

$L_0$  = potencial de generación de metano ( $m^3/Mg$ )

$M_i$  = masa de residuos recibida en el año  $i$  (Mg)

$t_{i,j}$  = edad de la sección número  $j$  de la masa de residuos  $M_i$  aceptada en el año  $i$

Para realizar los cálculos, LandGEM requirió que se ingrese información específica del relleno sanitario a analizar. Los datos necesarios y sus fuentes se mencionan a continuación. El año de inauguración (2003) así como las tasas de disposición de desechos (desde el 2003 hasta el 2011) se obtuvieron del más reciente Inventario de Emisiones de GEI – Sector Desperdicios realizado para la ciudad de Quito. Por otro lado, el año de cierre del relleno se estimó a partir de una nota de prensa del diario El Comercio. La nota informaba que, a pesar de estar cerca de llenarse el último cubeto disponible en 2020, El Inga seguirá en funcionamiento por tres o cuatro años más.

Además de los datos sobre el relleno sanitario, LandGEM también usa valores de constantes o parámetros de modelo para su cálculo. Debido a que LandGEM es un modelo desarrollado en Estados Unidos, los parámetros  $k$  y  $L_0$  tienen valores predeterminados para los rellenos sanitarios de ese país. Por tanto, para que el modelo se acoplara al relleno sanitario El Inga, fue necesario revisar los valores de  $k$  y  $L_0$ . La constante  $k$  pudo conservar su valor predeterminado en el modelo: 0,05. Se sugiere usar ese número en ausencia de otras alternativas, como sucede en este caso pues no existe un  $k$  específico para rellenos sanitarios en Ecuador.  $L_0$  se calculó nuevamente, con datos de la composición de residuos en Quito. Así, se obtuvo un valor de  $L_0 = 102 m^3/Mg$

Con esta información, LandGEM calculó las emisiones por año (en masa y en volumen) de biogás, dióxido de carbono, metano y compuestos orgánicos diferentes del metano que producirá el relleno sanitario por 140 años a partir de su inauguración. En esta investigación, solo se utilizaron los datos correspondientes a las emisiones de biogás en  $\text{m}^3/\text{año}$ . Con esos valores, se construyó la Figura 2.

La posterior transformación de las emisiones de biogás a electricidad se realizó mediante el factor de conversión:  $2 \text{ kWh}/\text{m}^3$  de biogás. Mediante conversión de unidades ( $1 \text{ MWh} = 1000 \text{ kWh}$ ,  $1 \text{ GWh} = 1000 \text{ MWh}$ ), se transformaron los kWh obtenidos a GWh y se construyó la Figura 3.