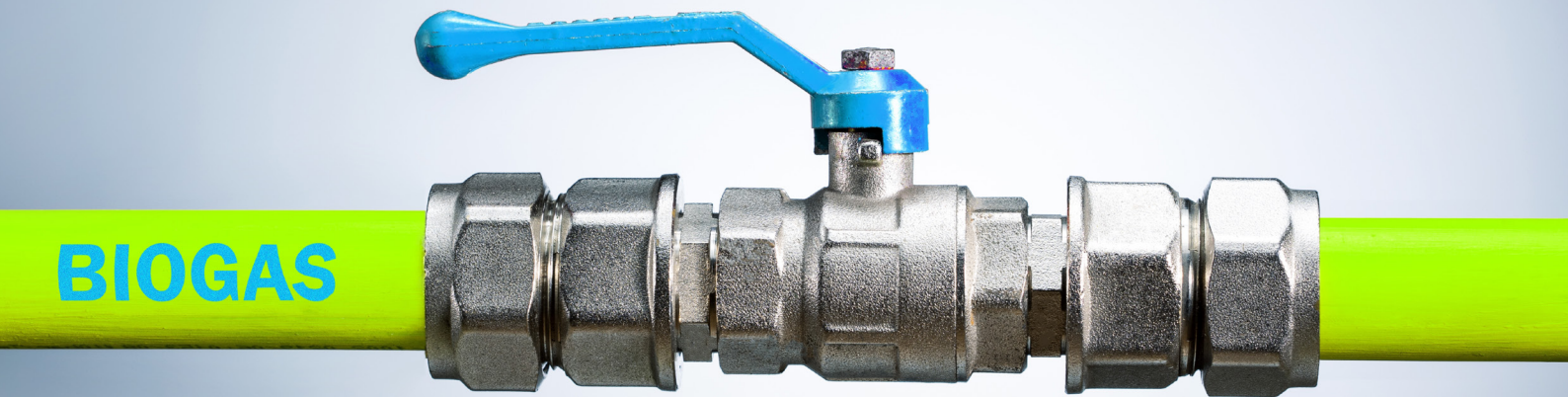


ESTADO ACTUAL DE LA BIODIGESTIÓN EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE



ESTADO ACTUAL DE LA BIODIGESTIÓN EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Coordinadores:

- Agustín Torroba
- Celestina Brenes Porras
- Mariela Pino Donoso
- Gloria Ximena Pedraza

ESTADO ACTUAL DE LA BIODIGESTIÓN EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

Equipo de trabajo:

- Adriano Henrique Ferrarez
- Agustín Torroba
- Alexandra Salinas Salinas
- Alfredo Curbelo Alonso
- Alfredo Erlwein
- Andrea Tamayo Londoño
- Carol Elvir Barahona
- Celestina Brenes-Porras
- Cláudio Leite de Souza
- Eliana Sotomayor
- Ernesto Barrera Cardoso
- Federico Vargas Lehner
- Florencia Rivarosa
- Gabriela Bonassa
- Gloria Pedraza Ordonez
- Ileana Pereda Reyes
- Jéssica Andrea Agresott
- Jesús Suárez Hernández
- Joaquín Víquez
- José Antonio Guardado
- José Carlos Aucancela
- José Luis Betelu
- José María Rincón
- Julio Pedrasa Gárciga
- Laura Marcela Mantilla Ávila
- Lisbet M. López González
- Lisbeth Judith Molina Sandoval
- Luis Cepero Casas
- María Aneley Routier
- María Mercedes Echarte
- Mariela Pino Donoso
- Miriam Cleide Cavalcante de Amorim
- Nadia Gabbanelli
- Nelida Pose
- Osmer Ponce
- Paula Tereza De Souza e Silva
- René Lauredo Pons
- Roberto Sosa Cáceres
- Rodolfo Daniel Silva Martínez
- Tiago Borges Ferreira
- Valentina Savran
- Viviana Solano Ramírez
- Yanet Jiménez Hernández
- Yasser Miguel Díaz Capdesuñer



IICA y RedBioLAC. 2023.
Estado actual de la biodigestión en América Latina y el Caribe.
San José, C.R.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) o Red de Biodigestores para Latino América y Caribe (RedBioLAC), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la RedBioLAC o el IICA los aprueban o recomiendan de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la RedBioLAC o IICA

ISBN 978-92-9273-030-7 IICA

© RedBioLAC, 2023



Algunos derechos reservados. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales.; https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es_ES).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que el IICA o la RedBioLAC refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo del IICA o la RedBioLAC. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de Red de Biodigestores para Latino América y Caribe (RedBioLAC) o IICA. El IICA/ RedBioLAC no se hacen responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en español será el texto autorizado".

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Descargas, derechos y licencias. Los productos informativos de la RedBioLAC están disponibles y pueden adquirirse dirigiéndose a la página web de la Organización (<http://redbiolac.org>). Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: yudta@redbiolac.org.

Diagramado: Rolan Santiago Bastidas

Diseño de portada: Rolan Santiago Bastidas

PRESENTACIÓN POR PARTE DEL INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA (IICA)

La plena utilización de los recursos biológicos constituye el eje fundamental del paradigma técnico-productivo denominado “bioeconomía”. A fin de maximizar la eficiencia en el uso de la biomasa, este se nutre de distintos “senderos”, entre ellos, la biotecnología, la ecointensificación, los servicios ecosistémicos y las biorrefinerías. Estas últimas generan biocombustibles, productos energéticos muy valorados por ser una opción renovable para sustituir a los combustibles fósiles.

Entre los biocombustibles en estado gaseoso, el biogás procedente de la digestión anaeróbica presenta singulares características en su proceso productivo y producto final que lo convierten en una opción relevante no solo en el mundo rural, sino también en el urbano.

Mediante la tecnología de la biodigestión, la bioeconomía potencia el aprovechamiento biológico de los recursos, haciendo posible el uso de residuos como materias primas que se transforman en insumos para la producción de energía y fertilizantes.

En el ámbito agrícola la producción de biogás en bajas y medianas escalas mejora el bienestar de los habitantes rurales, ya que permite producir energía limpia y accesible para zonas desconectadas de los sistemas de distribución de gas y/o electricidad, fabricar fertilizante biológico y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, ya que se trata de una tecnología de bajo costo y fácil operativización, esta se convierte en una buena opción, especialmente para las zonas rurales.

La presente publicación constituye una herramienta más que el IICA procura difundir para sensibilizar y generar capacidades, a fin de promover el uso de estas tecnologías que contribuyen a desarrollar de manera sostenible los recursos biológicos de las Américas.

Máster Agustín Torroba

Especialista internacional en Biocombustibles y Energías Renovables

Programa de Innovación y Bioeconomía

PRESENTACIÓN POR PARTE DE LA RED DE BIODIGESTORES PARA LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE (REDBIOLAC)

La RedBioLAC nace en 2009 en Perú, durante una pequeña reunión presencial de personas unidas en la necesidad de llevar a cabo un intercambio de conocimientos, dirigido al desarrollo de biodigestores en diferentes puntos de la región, en una época en la que la comunicación virtual no iba más allá de la utilización de correos electrónicos, mensajería y algunos sistemas de comunicación audiovisual de uso limitado y estacionario. Desde entonces esta amplia red de individuos incentiva y apoya la generación de conocimientos y experiencias desde y para América Latina, con base en el contexto climático, social y espacial de la región.

La dinámica de encontrarse presencialmente año a año se consolidó y dio pie a la celebración de diversos encuentros en diferentes países, donde durante una semana nos reuníamos para impartir cursos teóricos y prácticos, instalar biodigestores, conocer biodigestores locales y exponer los resultados de la investigación y nuevos avances en la materia. En estos espacios se daban intercambios y discusiones muy interesantes, por lo que la idea de poner toda esta información por escrito fue surgiendo naturalmente. En 2016 elaboramos nuestra primera publicación conjunta, a la que desde 2017 se sumaron consecutivamente las ediciones anuales de la Revista RedBioLAC, donde compartimos estudios de caso, artículos y cápsulas educativas. En 2017, en colaboración con el Instituto, a dichas publicaciones se sumaron seminarios y presentaciones en línea, lo que vino a consolidar los primeros esfuerzos efectuados en este sentido a partir de 2015 para difundir las experiencias y los conocimientos en el amplio mundo de la digestión anaeróbica.

La RedBioLAC está compuesta por estudiantes, académicos, docentes, instaladores, usuarios, empresas, asociaciones y promotores de esta práctica, cuyo ánimo de compartir los conocimientos generados no es de lucro y cuyo objetivo es viabilizar el establecimiento de biodigestores sobre la base del aprovechamiento de los residuos orgánicos en beneficio de la población y el medio ambiente.

Nuestra segunda publicación conjunta

En 2022 el documento intitulado *Estado actual de la biodigestión en América Latina y el Caribe* aparece luego de encontrarnos, conversar y preguntarnos ¿para qué se están usando los biodigestores en América Latina y el Caribe (ALC)? ¿Cómo se han ido construyendo y dando a conocer? ¿Cómo podemos idearlos y utilizarlos en nuestros territorios y realidades?

ALC es una región diversa y colorida, como también lo son los biodigestores y sus usos. Este libro es la continuación de una actividad derivada de las mesas de trabajo establecidas en el sexto encuentro celebrado en Colombia (2014) y en el séptimo, realizado en Chile (2015), la cual concluyó en 2016. En aquella primera publicación, intitulada *Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en LAC*, abordamos exclusivamente los biodigestores de escala familiar, alimentados por excremento de animales de traspatio.

En esta segunda publicación ampliamos el volumen y los tipos de materia orgánica por utilizar como sustrato y, por consiguiente, estamos abarcando nuevos sectores y fuentes de materia prima para generar biogás, como la agroindustria, la industria alimentaria y de bebidas, la ganadería lechera, la producción porcícola y avícola y, por supuesto, la generación de excremento de animales, sin olvidar los desechos domésticos, que normalmente constituyen más de la mitad del peso de la producción de residuos per cápita: la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU). Con una cantidad mayor de biodigestores se genera más biogás y más digestatos o efluentes; por lo tanto, aparecen nuevos desafíos y oportunidades que quisimos plantear en esta publicación.

Sin haberse celebrado ningún encuentro presencial de la RedBioLAC desde 2019 en un contexto de pandemia y cuarentenas, este libro se ha concebido de manera extraordinaria, sin espacios presenciales participativos previos a su publicación. Esta situación nos ha llevado a un proceso creativo y participativo virtual, iniciado por medio de la convocatoria de las personas inscritas para formar parte de los grupos de trabajo definidos durante el XI Encuentro de la RedBioLAC, llevado a cabo en La Habana, Cuba, en octubre de 2019.

Se efectuaron 42 autorías, dentro de las cuales se desarrollaron investigaciones que se incorporaron en las diversas experiencias que se comparten en esta publicación. Esta es solo una pequeña muestra del trabajo de los miembros de la RedBioLAC y de las personas y organizaciones que desarrollan los biodigestores en varias escalas y modelos a lo largo y ancho de la región latinoamericana; sin embargo, a partir de este esfuerzo, los lectores pueden tener una noción de las experiencias reales y prácticas en torno a los biodigestores instalados (capítulo 1), del potencial observado en este sentido en los diferentes países y regiones (capítulo 2), del aprovechamiento del biogás (capítulo 3) y del digestato (capítulo 4). Además, compartimos algunos análisis y descripciones de marcos legales y normativos asociados a la digestión anaeróbica (capítulo 5), así como de algunas redes que promueven el uso de los biodigestores (capítulo 6).

En esta ocasión la redacción de cada apartado fue efectuada por los autores y su equipo de apoyo. A modo de resumen, al inicio de cada capítulo se encuentran reflexiones que estos intercambiaron y discutieron, con el objetivo de transmitir mensajes clave ante la oportunidad que se presenta a través de los biodigestores para gestionar y valorar los residuos orgánicos en la región, a fin de obtener todos los beneficios que supone la aplicación de esta práctica en toda escala, no solo en los espacios rurales, sino también en los urbanos.

Estos mensajes clave o ideas fuerza se derivan de las lecciones aprendidas de la práctica y la puesta en marcha de proyectos e investigaciones. Son observaciones que se logran tras años de trabajo en el campo con usuarios, académicos, investigadores, tomadores de decisiones y todas las personas involucradas en el desarrollo de la biodigestión en ALC. Esperamos que este libro sea de utilidad para toda la comunidad interesada en este tema y, sobre todo, para quienes están incursionando en esta actividad. Con estas ideas fuerza buscamos brindar una respuesta anticipada a los cuestionamientos y desafíos a los que ellos se enfrentarán. Esperamos que resulten útiles para resolver los problemas y dar los primeros pasos que cada nuevo proyecto conlleva.

Mariela Pino Donoso y Gloria Ximena Pedraza

Contenido

Introducción.....	14
1. Capítulo 1. Panorama actual de los biodigestores en ALC en países seleccionados.....	15
1.1 Antecedentes y estado actual de la tecnología del biogás en Costa Rica	17
1.2 Registro de biodigestores domiciliarios en uso en Chile, modelos, contexto y empleos del biogás y del efluente	23
1.3 Estado actual de los biodigestores en Colombia	33
1.4 Situación actual y distribución regional de las plantas de biogás en Cuba.....	45
1.5 Síntesis de las experiencias apoyadas por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay	51
1.6 Unidades productoras de biogás en Brasil: escenario general y del sector del saneamiento y la FORSU en particular	53
2. Capítulo 2. Potencial de generación de biogás a partir de residuos en ALC en países seleccionados.....	60
2.1 Tecnologías y casos testigos de DA aplicada a la FORSU en la provincia de Santa Fe, Argentina	63
2.2 Producción de biogás a partir de residuos de alimentos: unidad de demostración en Belo Horizonte, Brasil.....	71
2.3 Potencial del biogás en Colombia.....	76
2.4 Potencial de producción de biogás en Costa Rica.....	82
2.5 Potencial de generación y aprovechamiento de biogás a partir de residuos de la agroindustria frutícola en el semiárido brasileño	84
2.6 Estimación de la producción de biomasa, la generación de biogás y el potencial energético en lecherías de la región de Los Ríos, Chile.....	109
2.7 Condominio de agroenergía en un municipio de Minas Gerais, Brasil: potencial para la producción de biometano a partir de residuos agrícolas	117
2.8 Potencial de producción de biogás en Argentina	122
2.9 Desafíos para desarrollar el potencial de producción de biogás en Honduras	131
2.10 Potencial de producción de biogás en Cuba.....	135
3. Capítulo 3. Tecnologías de utilización del biogás con fines térmicos, mecánicos y de combustible	140
3.1 Descripción completa de diferentes alternativas de uso del biogás.....	141

4.	Capítulo 4. Ejemplo de usos de bioles en países seleccionados de Latinoamérica	163
4.1	Parámetros de calidad, casos de éxito, alternativas de aprovechamiento y normativa del biol	165
4.2	Producción y aptitud fertilizante del digestato proveniente de plantas de DA en Chile .	184
5.	Capítulo 5. Marco legal y normativo de biodigestores, biogás y digestato en países seleccionados de Latinoamérica.....	192
5.1	Estado actual de las políticas nacionales de tratamiento de la FORSU a través de la DA en Brasil y México	193
5.2	Marco legal y normativo en Colombia: política pública en torno a la DA	204
5.3	Revisión de los marcos regulatorio y normativo de Cuba sobre la DA.....	209
5.4	Introducción y análisis situacional de Argentina	215
5.5	Estado actual y áreas de oportunidad en materia de políticas nacionales para la implementación de la DA en Paraguay.....	223
5.6	Marco normativo de residuos de Brasil.....	229
6.	Capítulo 6. Casos de redes, asociaciones y organizaciones que trabajan con la DA de residuos	233
6.1	El MUB en Cuba.....	234
6.2	Redes y movimientos de biogás en Ecuador	238
7.	Capítulo 7. Consideraciones finales sobre el estado actual de la biodigestión en ALC.....	247
	Anexos.....	251

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 Biodigestor tipo Taiwán.	17
Ilustración 2 Proyectos de biogás implementados o apoyados por el Programa de Biogás del ICE.....	18
Ilustración 3 Primer biodigestor de geomembrana de PVC en Costa Rica.....	20
Ilustración 4 Proyectos de biodigestión ejecutados en universidades de Costa Rica.....	20
Ilustración 5 Ejemplos de biodigestores fabricados por los emprendimientos	21
Ilustración 6. RAFA instalado en el beneficio de café de Volcafé, Heredia, Costa Rica.....	21
Ilustración 7 Primera Junta Directiva de la AsoBiogás 2015.....	22
Ilustración 8. Mapa de las 15 regiones de Chile, con la región del Maule destacada	23
Ilustración 9. Mujer cocinando y calefaccionando su casa con leña.....	24
Ilustración 10. Biodigestor del INDAP instalado en la zona central, proyecto piloto de Lampa, período 2015-2016.....	28
Ilustración 11. Prototipo de biodigestor educativo en invernadero para escuelas.	29
Ilustración 12 Contenedor de policarbonato transparente	31
Ilustración 13. Promedio histórico del clima en la región de Los Ríos, Chile.....	31
Ilustración 14. Susana de Lanco utiliza el biogás en sus artesanías y el digestato, en su huerta.	32
Ilustración 15. Biodigestor inflado,.....	39
Ilustración 16. Biodigestor tubular ubicado en la finca La Peluza, departamento de Meta, Colombia.....	40
Ilustración 17. Biodigestores tipo caneca en serie, Reserva Natural Rancho Camaná, departamento de Meta, Colombia.....	41
Ilustración 18. Biodigestores tipo caneca en la finca Moniyamena, departamento de Meta, Colombia.....	41
Ilustración 19. Biodigestor tubular instalado en el municipio de Bolívar, Valle del Cauca.....	42
Ilustración 20. Biodigestores de campana móvil y cúpula fija de diferentes tamaños.	47
Ilustración 21. Biodigestores de geomembranas tubulares de 12, 30 y 16 m ³ , ubicados en los municipios Camajuaní, Los Palacios y Perico.	48
Ilustración 22 Lagunas cubiertas	49
Ilustración 23 Biodigestor tubular instalado en el Centro de Capacitación y Tecnología Apropriada de la FCA-UNA	51
Ilustración 24 Ubicación de las plantas de producción de biogás en Brasil	54
Ilustración 25 Ubicación de las plantas de producción de biogás en el sector de saneamiento de Brasil.....	56

Ilustración 26 Plantas de digestión húmeda de la fracción biodegradable de los RSU de las localidades de Ataliva (izquierda) y Emilia (derecha), Santa Fe, Argentina.	64
Ilustración 27 Planta de digestión seca ubicada en Rafaela, Santa Fe, Argentina.	65
Ilustración 28 Proceso de alimentación (izquierda) y sustratos de plantas de digestión húmeda (derecha).	68
Ilustración 29 Biodigestor anaerobio instalado en la pMethar/UFMG.	72
Ilustración 30. Estudios desarrollados en la pMethar/UFMG desde su establecimiento.	73
Ilustración 31. Ejemplos de residuos disponibles en Costa Rica utilizados en la estimación del potencial de biogás.	83
Ilustración 32. RIDE Polo Petrolina/Juazeiro.	85
Ilustración 33. Complejo agroindustrial de la fruticultura.	86
Ilustración 34. Flujograma del procesamiento en la empresa NIAGRO.	90
Ilustración 35. Evolución de la producción de jugo de uva en el valle del submedio San Francisco.	91
Ilustración 36. Efluente de ultrafiltración del procesamiento de acerola.	92
Ilustración 37. Residuos sólidos del procesamiento de la uva.	93
Ilustración 38. Orujo de uva sin semillas.	93
Ilustración 39. Orujo que contiene semillas (a) y tallos (b).	94
Ilustración 40. Lavado de la uva (a) y efluente resultante del lavado de la uva (b).	94
Ilustración 41. Flujograma de la herramienta computacional SAUDADE.	117
Ilustración 42. Ubicación de Jequeri.	118
Ilustración 43. Ubicación de las granjas porcinas en el municipio de Jequeri.	118
Ilustración 44. Trazado de los ductos en el municipio de Jequeri.	120
Ilustración 45 Establecimientos de cría en la Argentina.	125
Ilustración 46 Ensayo de evaluación de cultivares de trigo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (A) y rastrojos de maíz (B).	126
Ilustración 47. Estufas o fogones más utilizados y sus adaptaciones en América Latina.	142
Ilustración 48. Adaptación de una estufa a través del 1) incremento del diámetro del orificio de inyección, 2) la conexión directa al quemador y 3) el mayor ingreso de aire secundario.	143
Ilustración 49. Ollas arroceras que funcionan con biogás.	143
Ilustración 50. Ejemplo de criadoras de biogás utilizadas en la calefacción de lechones.	144
Ilustración 51 Ejemplos de lámparas de biogás utilizadas en Nicaragua y Cuba.	145
Ilustración 52 Calefacción de agua para la limpieza de equipos de producción de leche en Costa Rica.	145

Ilustración 53. a) Diferencia entre el diámetro de inyección de combustible de un equipo de gas propano (GLP) y el de otro equipo de biogás similar y b) aumento del diámetro de inyección, empleando un taladro.....	146
Ilustración 54 Calentador de paso (calefón).....	146
Ilustración 55. Componentes fundamentales del refrigerador de biogás de absorción-difusión.	147
Ilustración 56. Prototipos de refrigeradores de biogás en escenarios rurales de Cuba.....	148
Ilustración 57. Quemador de biogás para la generación de calor en un deshidratador de alimentos en Paraguay.....	149
Ilustración 58. Ejemplos de diferentes aplicaciones de motores de biogás.....	150
Ilustración 59. Pasos para cambiar un sistema de carburación de gasolina por uno de carburación de gas en un motor Briggs & Stratton de 6.5 HP, empleado en un equipo de ordeño.	150
Ilustración 60. Otros ejemplos de adaptaciones de un motor para que funcione con biogás	150
Ilustración 61. Ejemplo de modificación del tiempo de encendido de la chispa.....	151
Ilustración 62 Ejemplos de aplicación de biogás en generadores eléctricos de varias escalas	152
Ilustración 63. Proyecto Ajuricaba.....	155
Ilustración 64. Cocina, biodigestor, conductor y lámpara de biogás en el motel Las Texas, municipio Ranchuelo, provincia de Villa Clara, Cuba.....	156
Ilustración 65. Red de distribución de biogás en la comunidad rural El Colorado, en el municipio de Cabaiguán, provincia de Santi Spíritus.....	156
Ilustración 66. Biodigestor de Los Pinos.....	158
Ilustración 67. Integración de energías renovables: (A) energías renovables físicas y químicas y (B) emisiones comparativas de CO ₂	159
Ilustración 68. Usos del biofertilizante Wanu Allpa en Ecuador.....	167
Ilustración 69. Aplicaciones foliares de biol.....	169
Ilustración 70. Productora Teresa Chanataxi, de la Asociación Agropecuaria Cotogchoa.....	170
Ilustración 71. Estimulación radicular generada por el biol en la Solanum lycopersicum, cultivada en sustrato inerte (cascajo) en la primera semana de trasplante. De izquierda a derecha: solución orgánica (biol), solución orgánica (biol) más minerales y solución mineral.....	171
Ilustración 72. Efectos de altas concentraciones de biol en el cultivo de uvilla.....	171
Ilustración 73. Medición de los parámetros de conductividad eléctrica y pH en los bioles.....	171
Ilustración 74. Capacitación a los productores del cantón Yacuambi en la provincia de Zamora Chinchipe (2020).....	172
Ilustración 75. Etapas del ciclo del nitrógeno.....	174

Ilustración 76. Proceso de desamonificación en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno.....	177
Ilustración 77. Planta de tratamiento de residuos de restaurantes, frutas y otros productos orgánicos ubicada en Foz de Iguazú, Brasil, CIBiogás.	194
Ilustración 78. Planta de tratamiento de la FORSU, aguas residuales y residuos cárnicos en Atlacomulco, México. Asociación Mexicana de Biomasa y Biogás A. C. (AMBB).	202
Ilustración 79. Distribución territorial.	216
Ilustración 80. Objetivos de generación de energía eléctrica renovable según la Ley 27 191.	219
Ilustración 81. Costo de la energía sin impuestos (MMBTU).	221
Ilustración 82. Las diferentes etapas del MUB y la prevista para su segundo período (MUBFRE).	235
Ilustración 83. Estructura del funcionamiento del MUB.	236
Ilustración 84. Mapa de actores según su relevancia en su área de intervención.	239
Ilustración 85. Trabajo de la Red de Biodigestores del Ecuador (RedBioEc) y su conexión con otros actores del sector para expandir el conocimiento teórico-práctico de la biodigestión en el país.	274
Ilustración 86. Aporte de Biodigestores Mundo Intag y cooperación entre varios actores en talleres realizados por la RedBioEc, la Coordinadora Ecuatoriana de Agroecología e instalaciones independientes en torno a la utilidad del biogás a escala doméstica y productiva.	275
Ilustración 87. Instalación de un biodigestor en la provincia de Tungurahua con fines de aprovechamiento productivo.	276

Índice de tablas

Tabla 1. Promedio histórico del clima en la región de Los Ríos, Chile	34
Tabla 2. Sectores y biomásas residuales en Colombia	37
Tabla 3. Biogás utilizado como fuente de energía para el desarrollo de las actividades agropecuarias .	39
Tabla 4. Comparación de las variables de diseño, equipamiento y operación de las plantas de DA de la fracción biodegradable de los RSU ubicadas en la provincia de Santa Fe, Argentina	60
Tabla 5. Biomásas identificadas y cantidad y tipo de residuos de los diferentes sectores productivos.	72
Tabla 6. Producción de uva en toneladas en los principales estados productores	82
Tabla 7. Composición de los residuos del procesamiento de la acerola	86
Tabla 8. Cuantificación de la generación de los residuos vinícolas	88
Tabla 9. Características cualitativas de los residuos sólidos y los efluentes vinícolas	89
Tabla 10. Potencial de producción de biogás y energía de la agricultura en 2015	90
Tabla 11. Rendimientos en la vitivinicultura según diversas fuentes bibliográficas	90
Tabla 12. Rendimientos de los residuos de acerola	91
Tabla 13. Potencial de metano de los residuos de la agroindustria frutícola en la RIDE Polo Petrolina (PE)/Juazeiro (BA)	91
Tabla 14. Detalle de número de animales y producción de purines por tamaño de plantel	103
Tabla 15. Potencial valor teórico de generación de biogás a partir de la DA de purines de vacunos de lechería	103
Tabla 16. Biogás total y máximo teórico de generación de energías eléctrica y térmica	105
Tabla 17. Biogás de pequeña escala y valores de sustitución de otros combustibles utilizados	105
Tabla 18. Ejemplo de autosuficiencia térmica familiar a través de la instalación y el uso de un biodigestor	107
Tabla 19. Potencial de producción de biogás a partir de los principales residuos pecuarios producidos en Argentina	117
Tabla 20. Cantidades de excretas y orina e índices de producción de biogás en ganado porcino, vacuno y aviar	127
Tabla 21. Volúmenes de residuos orgánicos (excretas y orina) y producción de biogás derivada del ganado porcino, aviar y vacuno considerado para el cálculo en Cuba	128
Tabla 22. Redes de biogás en Cabaiguán, Santi Spíritus	149
Tabla 23. Composición de los bioles de Terrabiol	160
Tabla 24. Comparación de parámetros sugeridos	171
Tabla 25. Producción actual de digestato en las regiones V y X de Chile	177
Tabla 26. Generación anual de residuos y potencial de digestato en Chile entre las regiones V y X, con los valores estimados de humedad y digestibilidad correspondientes a cada uno	177
Tabla 27. Objetivos superiores y específicos que impulsan el uso de biodigestores en Paraguay	214
Tabla 28. Objetivos específicos del subsector de la bioenergía y fuentes alternativas de energía	216
Tabla 29. Planes de acción y su vinculación con objetivos estratégicos, líneas estratégicas, instrumentos, metas y plazos	217

Índice de gráficos

Gráfico 1. Cantidad de biodigestores por región en Cuba	20
Gráfico 2. Cantidad de biodigestores implementados en Cuba por provincia	20
Gráfico 3. Costos de los diversos combustibles disponibles en la zona sur de Chile	27
Gráfico 4. Distribución de las unidades productivas en la zona rural censada, según el tipo de energía utilizada en el desarrollo de actividades agropecuarias	34
Gráfico 5. Potencial energético de cada una de las biomásas seleccionadas	73
Gráfico 6. Potencial porcentual de producción de metano según el sector considerado en el análisis ..	77
Gráfico 7. Potencial de producción de biogás por regiones de los sectores porcino, vacuno y aviar en Cuba	128
Gráfico 8. Potencial de producción de biogás por provincias derivada del ganado porcino, vacuno y aviar en Cuba	129
Gráfico 9. Consumo de biogás según la potencia del motor	143
Gráfico 10. Combustible utilizado principalmente para cocinar	205

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta publicación conjunta es difundir entre los decisores de política pública, el sector privado, la academia, las organizaciones no gubernamentales y la población en general, principalmente la de habla hispana, información en torno a la importancia, el uso y la consolidación de la biodigestión en ALC.

La heterogeneidad de la región en cuanto a su geografía y recursos naturales le brinda una serie de ventajas que constituyen una oportunidad para el desarrollo de la biodigestión.

Pese a los máximos beneficios que ofrece el biogás en términos ambientales, sociales y económicos, aún se desconoce gran parte de su utilidad en la vida cotidiana y en la agricultura rural, debido a lo cual ambas instituciones, en colaboración con expertos en la materia, suman esfuerzos para dar a conocer, mediante este documento, el estado actual de la biodigestión en ALC.

En el capítulo 1 se presentan experiencias reales y prácticas de los biodigestores instalados, en el capítulo 2 se describe el potencial de esta técnica, observado en los diferentes países y regiones, y en el 3 se explica el aprovechamiento del biogás.; y otras vías de aprovechamiento de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan algunos análisis de marcos legales y normativos asociados a la digestión anaeróbica y, en el 6, se describen algunas redes que promueven el establecimiento de biodigestores.

Al principio de cada capítulo se encuentran las principales premisas, mientras que al final del documento se presentan las principales consideraciones sobre la biodigestión, incluidos los desafíos y las oportunidades que supone su implementación y recomendaciones con respecto a ella.

1

CAPÍTULO

CAPÍTULO 1.

PANORAMA ACTUAL DE LOS BIODIGESTORES EN ALC EN PAÍSES SELECCIONADOS¹

En cuanto a los biodigestores familiares y la escala de sus usos domésticos

Para instalar biodigestores de alta adopción y operación regular dentro de proyectos domésticos con articulación municipal, de desarrollo rural o de organizaciones de base resulta fundamental planificar su implementación paulatina. En un proyecto a largo plazo los futuros usuarios deben conocer la experiencia por medio de sus pares, demostrar interés, invertir esfuerzo y recursos en el establecimiento de un biodigestor, pagar un porcentaje mínimo del costo de la tecnología y contar con un espacio donde el abono y el biogás sean apreciados y utilizados. En este sentido, vincular el aprovechamiento de los subproductos con iniciativas en marcha genera proyectos muy positivos. Algunos ejemplos de ello son las personas dedicadas a la horticultura, quienes los utilizan como abono para sus plantas; las artesanas, que usan el biogás en el teñido de lanas; algunas familias productoras de ganado de traspatio, que emplean el purín de el biodigestor; y los productores de quesos u otros productos pasteurizados que usan el biogás en la caldera y en la sala de maduración de los quesos.

Esta implementación paulatina conlleva durante los primeros años una etapa de asistencia y capacitación, dirigida en particular a las personas cercanas a los usuarios finales. En un proyecto de largo plazo una etapa de desarrollo madura, que resulta ampliamente beneficiosa, se puede reconocer cuando los mismos usuarios pueden ayudarse y educarse entre sí, lo que indica que ya hay muchas capacidades instaladas en los territorios. Estos procesos ocurren solo cuando se comparten las malas y buenas experiencias y se aprende de ellas. En general, se ha observado que los proyectos con pocos recursos o un espacio temporal muy limitado corren el riesgo de no seguir funcionando, debido a que no se les da seguimiento. Lo mismo ocurre con proyectos en que los sistemas se otorgan gratuitamente, sin conocer las necesidades o el interés de las familias, ni haberles informado sobre el trabajo diario que conlleva operar satisfactoriamente un biodigestor en casa. Algunas iniciativas locales, como los fondos rotatorios, han contribuido a aumentar la capacidad de pago e inversión en los sistemas entre usuarios pertenecientes a organizaciones de base. Resulta esencial considerar métodos de financiamiento de los sistemas para ponerlos a disposición de los habitantes de las zonas rurales que más los necesitan, en la medida en que más familias muestren interés en adquirirlos.

¹ Autores: Luis Cepero Casas, José A. Guardado, Joaquín Viquez, Mariela Pino, Andrea Tamayo, Federico Vargas, Tiago Borges y Viviana Solano

Además, es importante escoger/diseñar un modelo de biodigestor que se adapte a las necesidades locales, al clima, al nivel de la napa freática, a la disponibilidad de agua, etc. En este sentido, un importante beneficio ha sido el desarrollo de un gasómetro externo, que asegura la presión del sistema. Esta incorporación constituye una mejora considerable y una ventaja comparativa para quienes desean reemplazar el gas licuado de petróleo (GLP) y seguir cocinando con una comodidad y una funcionalidad similares a las que este combustible ofrece.

En términos de eficacia, son importantes no solo la identificación, el monitoreo, el estado de operación y la distribución geográfica de los biodigestores instalados, sino también la disponibilidad de bases de datos que contribuyan a generar confianza y a considerarlos una solución real, factible y útil. La determinación de las mejores prácticas de implementación en un nicho geográfico específico por parte de los municipios, tomadores de decisiones y otros potenciales usuarios es fundamental para ampliar los proyectos.

Con respecto a las tecnologías difundidas y utilizadas, cuando se lleva a cabo la importación de biodigestores prefabricados se debe considerar la disponibilidad de repuestos y accesorios para realizar reparaciones de forma permanente, a fin de evitar fracasos asociados a la falta de insumos.

Otros factores podrían contribuir al éxito de los proyectos o programas a largo plazo, como el mantenimiento por parte de las diferentes administraciones políticas de los intereses y planes de trabajo, incluso cuando se presentan cambios de gobierno, para no afectar la provisión de soluciones a los pequeños agricultores.

Finalmente, cabe considerar que un proyecto malogrado es mucho más visible y genera más comentarios que uno exitoso, lo que daña la confianza de los potenciales usuarios de los biodigestores; por lo tanto, se debe evitar su masificación acelerada en otras zonas geográficas.

Sobre los biodigestores productivos de gran escala

Es esencial que la instalación de los biodigestores vaya acompañada de actividades de capacitación, que su uso surja de la necesidad de los productores y no como una actividad ajena a su realidad y que se efectúen el acompañamiento y el seguimiento correspondientes hasta lograr la apropiación de la tecnología. En Colombia se generó un proceso propio, desde abajo, gestionado por los actores locales, que incluye el intercambio de experiencias y el apoyo mutuo, dentro del cual los biodigestores fortalecen la soberanía de los pequeños y medianos productores agropecuarios de las zonas rurales. Adicionalmente, muchos programas de extensionismo y asistencia técnica los han utilizado para mejorar la rentabilidad de las fincas y para evitar denuncias ambientales por el mal manejo de sus residuos.

En los sistemas de gran escala la digestión anaerobia (DA) se utiliza sobre todo como un método de gestión de residuos biodegradables y aguas residuales, que abre paso a la valorización energética y de los nutrientes reincorporables a los suelos agrícolas, lo que contribuye a la adopción del modelo de innovación de la producción de alimentos y energía para el medio rural como una alternativa viable para el desarrollo y la sostenibilidad de los pueblos.

En los países donde se modificó la legislación acerca de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con DA se abre la posibilidad de desarrollar más proyectos con inversión

privada. Aunque estas tecnologías están ganando fuerza, sobre algunos proyectos de gran escala fallidos pesa mala fama. Sistemas de DA con codigestión, bien diseñados y terminados, constituyen una buena estrategia de mercadotecnia y a través de ellos se concientiza a la población con respecto a la segregación de los residuos en su lugar de origen y a su manejo mediante su recolección diferenciada en las zonas urbanas por parte de los municipios y otros gestores de residuos.

Respecto del uso de diversas tecnologías, los modelos de lecho de lodo de flujo ascendente (UASB) han sufrido un descrédito debido a los malos olores que generan, por lo tanto, es fundamental planificar todas las acciones posibles para mitigar las emisiones fugitivas y filtraciones de H₂S en el ambiente.

Hoy, por medio de políticas públicas, se debe incentivar la inversión en grandes sistemas de producción de electricidad, calor y/o biometano, dada la necesidad de mitigar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) derivados de los procesos de producción y uso de energía a partir de combustibles fósiles.

1.1 Antecedentes y estado actual de la tecnología del biogás en Costa Rica

Autor: Joaquín Víquez Arias

Costa Rica presenta una amplia historia de empleo e implementación de biodigestores. Aunque los primeros usos del biogás no están claramente documentados, a inicios y mediados de los años setenta José Gabriel Castillo Araya, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, puso en funcionamiento varios sistemas de biogás (Araya 2015).

Desde principios de los noventa, con el inicio de las lecciones en la Universidad EARTH y través de sus programas de Transferencia Tecnológica y cursos de Producción Animal, impartidos por el Prof. Raúl Botero, la tecnología de biodigestores se ha difundido de forma amplia en el campus de dicha universidad, las fincas de productores aledañas y, principalmente, mediante los ahora más de 2000 graduados de dicha institución de enseñanza, distribuidos por toda América Latina. La tecnología difundida en ese entonces, introducida a finales de los ochenta por el Prof. Botero (Botero y Preston 1987), fue el biodigestor tipo Taiwán, originalmente traído en 1986 desde dicho país al Convenio Interinstitucional para la Producción Agropecuaria del Valle del Cauca (CIPAV) de Cali, Colombia, por el Dr. Thomas R. Preston (Botero y Preston 1987), donde se efectuaron cambios en su diseño original, adaptando sus materiales e instalación en fincas privadas de todo el país (ilustración 1).

Ilustración 1. Biodigestor tipo Taiwán



Nota: A la izquierda, el Prof. Botero instala un biodigestor en la Universidad EARTH, circa 2002. A la derecha, un biodigestor tipo Taiwán se halla en operación. Abajo, el Prof. Botero, junto con el Dr. Thomas Preston, posa cerca de un biodigestor tipo Taiwán.

Desde entonces la tecnología de biodigestores fue poco a poco tomando fuerza, como parte de programas estatales de difusión y extensión, planes de estudios y emprendimientos. A continuación se detallan las iniciativas de mayor relevancia que llevaron a Costa Rica a ser uno de los usuarios de biodigestores más importantes de la región.

1.1.1 Biodigestores por todos lados

Con el impulso inicial de la Universidad EARTH, en especial por medio de sus graduados, la tecnología de biodigestores fue incorporada poco a poco en iniciativas privadas y estatales con diferentes fines. A continuación se mencionan algunas de las más importantes.

- **Programa de Biogás del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)**

Irene Cañas, exviceministra de Ambiente y Energía (período 2014-2018) y actual presidenta del Grupo ICE, inició el **Programa de Biogás** entre 2009 y 2010 como una iniciativa para aprovechar y valorizar los residuos orgánicos de la agroindustria desde un punto de vista energético, como una responsabilidad social y empresarial de dicho grupo, de conformidad con la Estrategia 4.0, el Plan de Descarbonización y el VII Plan Nacional de Energía (Hernández, 2021). Tal programa se fortaleció con el financiamiento de la Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica del Sistema de la Integración Centroamericana, dirigido a implementar proyectos piloto. Además, el Programa recibió respaldo de la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ), a través del Proyecto 4E, así como de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo².

Mediante dicho programa, liderado en la actualidad por la Ing. Carolina Hernández, se ha respaldado la implementación de más de 40 proyectos de biogás de gran escala, entre los cuales se destaca el proyecto de Sustratos de la Ribera S. A., uno de los proyectos de biogás industriales más grandes y exitosos del país (ilustración 2).

Ilustración 2. Proyectos de biogás implementados o apoyados por el Programa de Biogás del ICE



Nota: De izquierda a derecha: 1) finca lechera de Luis Blanco, ubicada en Zarcero; 2) biodigestor de Porcina Americana S. A.; y 3) Sustratos de la Ribera S. A.

²Hernández, C. 2021. Biogás (entrevista). San José, Costa Rica, ICE.

- **Programas de manejo de cuencas**

En 2015 la noticia de que durante 75 días (desde inicios de enero hasta el 16 marzo) Costa Rica llevó a cabo sus operaciones con energía renovable dio la vuelta al mundo (Instituto Meteorológico. s.f.). Ello se logró por medio de su diversa matriz energética, cuya energía hidroeléctrica generada constituye el 66 % de la energía total. Los operadores de servicio eléctrico, como el ICE, la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) y la Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago, entre otros, implementaron proyectos de protección de cuencas para reducir la descarga de sedimentos orgánicos a los embalses a través de biodigestores.

Por ejemplo, en 2004, en la cuenca media de los ríos Virilla, Aranjuez y Balsa, la CNFL instaló más de 200 biodigestores mediante subsidios en materiales³. Asimismo, en las cuencas del Toro, Sarapiquí y Peñas Blancas, entre otras, el Grupo ICE trabajó en la instalación de más de 300 unidades, dentro de sus esfuerzos de protección de cuencas.

- **Iniciativas de extensión y asistencia técnica**

En Costa Rica los biodigestores han tenido su nicho en el sector agropecuario, pues se dispone de una buena cantidad de residuos orgánicos (estiércol de animales) y existe la necesidad de manejarlos adecuadamente y de encontrar otras formas de mejorar la rentabilidad de las fincas. Por lo tanto, muchas iniciativas de extensionismo y asistencia técnica han utilizado los biodigestores como una herramienta dirigida a mejorar la rentabilidad o proporcionar a las fincas herramientas para evitar las denuncias ambientales por mal manejo de sus residuos. Algunos ejemplos concretos de tales iniciativas son los siguientes (ilustración 3):

- **El Ministerio de Agricultura (MAG)** utilizó los biodigestores bajo el concepto de buenas prácticas agropecuarias y medidas de mitigación del cambio climático. Personal del MAG visitaba fincas, brindaba asesoría en la implementación de los biodigestores y, en ocasiones, apoyaba con la compra de materiales y la instalación.
- **El Instituto de Desarrollo Agrario**, encargado de liderar el desarrollo de las comunidades rurales de Costa Rica y de ejecutar las políticas de desarrollo rural del Estado, incluyó los biodigestores en sus paquetes de apoyo rural, específicamente en sus módulos de ganadería (animales, materiales para corrales y biodigestores).
- La **Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos** implementó en 2008 el Programa Agroambiental, que brindaba asistencia técnica a sus 1600 productores lecheros asociados. Dentro de esta iniciativa se implementaron biodigestores como una alternativa viable para el manejo de los desechos (requisito de la recién publicada Ley General del Servicio Nacional de Salud Animal [Ley SENASA]) y se instaló el primer biodigestor de geomembrana de PVC en Costa Rica.

³ Vargas, A. 2021. Biogás (entrevista). San José, Costa Rica, CNFL.

Ilustración 3. Primer biodigestor de geomembrana de PVC en Costa Rica

Nota: Instalado en la finca Alejandro Romero, Aguas Zarcas, en 2008.

- **Programas universitarios.** Prácticamente todas las universidades estatales de Costa Rica han implementado proyectos de biodigestión no solo en sus programas de estudio, sino también de carácter investigativo, muchas veces en alianza con universidades en el extranjero (ilustración 4).

Ilustración 4. Proyectos de biodigestión ejecutados en universidades de Costa Rica

Nota: De izquierda a derecha:

Universidad de Costa Rica (UCR), Alfredo Volio Mata; Universidad Técnica Nacional, sede de Atenas; y UCR, Fabio Baudrit (digestor termofílico).

- **Emprendimientos**

A inicios de la primera década del siglo XXI en Costa Rica surgieron emprendimientos que incluían la implementación de biodigestores (ilustración 5). **Gerardo Umaña**, uno de los primeros emprendedores, quien asistió durante años al Prof. Botero en la Universidad EARTH, instaló gran variedad y cantidad de sistemas en Costa Rica y en el exterior.

De la misma forma, Rosa Mayorga y Pablo González, graduados de dicha universidad, iniciaron **Biosinergia Alternativa S. A.**, un emprendimiento basado en la construcción del sistema RUMMEN, enfocado principalmente en aguas residuales de origen doméstico, (hotelería, residencias) pero también en la agroindustria y las fincas ganaderas.

Viogaz S. A., fundada por Joaquín Víquez, graduado de la Universidad EARTH, se basó en unidades modulares prefabricadas a partir de geomembrana de PVC, lo que aceleró la

colocación de biodigestores en Costa Rica. Aparte de su modelo Viogaz, se establecieron también lagunas cubiertas de polietileno de alta densidad, cuyo principal mercado fue las fincas agropecuarias, aunque también incursionaron en la agroindustria y las aguas residuales domésticas.

Eco Soluciones S. A., una iniciativa privada liderada por Luciano Machado, también un egresado de dicha universidad, ejecutó varios proyectos de biogás en Costa Rica. En los últimos años han ido surgiendo nuevos actores como **BioMatec** e iniciativas sin fines de lucro como **Biogás para Todos**.

Ilustración 5. Ejemplos de biodigestores fabricados por los emprendimientos



Nota: De izquierda a derecha: 1) biodigestor de polietileno, implementado por Gerardo Umaña; 2) biodigestor Rummen de BioSinergia; 3) biodigestor Viogaz; e 4) iniciativa Biogás para Todos.

- **Biodigestores en el tratamiento de aguas residuales.** Finalmente, los biodigestores también han sido utilizados en la agroindustria como una unidad de tratamiento de aguas residuales. A inicios del siglo XXI, con el endurecimiento de las regulaciones ambientales, muchas industrias mejoraron sus unidades de tratamiento por medio de la incorporación de biodigestores. Un ejemplo de ello lo constituyen los beneficios de café, que implementaron reactores anaeróbicos de flujo ascendente (ilustración 6) (RAFA).

Ilustración 6. RAFA instalado en el beneficio de café de Volcafé, Heredia, Costa Rica



1.1.2 Consolidación del sector a través de la Asociación Costarricense de Biogás (AsoBiogás)

A inicios de 2015, gracias al aporte de la GIZ, se conformó la **AsoBiogás** (ilustración 7), con el objetivo de dinamizar el sector, creyendo que el biogás es una herramienta estratégica en la mitigación de los efectos del cambio climático y la adaptación a ellos en Costa Rica. Durante

este período la AsoBiogás ha realizado esfuerzos para consolidar la tecnología en el país, apoyando incluso la elaboración de la primera norma de biogás en Costa Rica INTE E56:2020: Requisitos mínimos para las plantas de biogás de escala mediana y grande y sus componentes asociados.

Ilustración 7. Primera Junta Directiva de la AsoBiogás 2015



Nota: En la foto: Joaquín Viquez, Carlos Saborío, Carolina Hernández, Mariana Murillo, Adrián Sandí, Lidieth Uribe, Alberto Miranda y Werner Rodríguez.

1.1.3 Biodigestores en números

Es difícil cuantificar con precisión los biodigestores instalados en Costa Rica y resulta aún más difícil conocer cuáles todavía se mantienen en operación. No existen registros⁴ formales de biodigestores. En 2017 la AsoBiogás realizó un análisis basado en la información proporcionada por diferentes actores para calcular la cantidad de unidades que han sido instaladas en el país (AsoBiogás 2017).

Mediante el análisis se cuantificaron casi 500 biodigestores, sumando en total casi 63 000 m³ de volumen líquido del biodigestor. El 40 % de este volumen es acaparado por granjas porcinas, el 17 %, por la industria de la palma aceitera (por un proyecto de 10 000 m³) y el 12 %, por proyectos agroindustriales. Más del 50 % de estos sistemas son lagunas cubiertas o biodigestores de bolsa (flexibles). Por número de biodigestores, la gran mayoría (80 %) utiliza el biogás en la cocción (energía calórica).

Desafortunadamente, no se dispone de información en relación con el uso del digestato como fertilizante; no obstante, dado que los biodigestores se han utilizado principalmente en el tratamiento de los residuos, se asume que el digestato recibe un postratamiento para cumplir las normas nacionales, aunque también se usa como mejorador de los suelos.

⁴ Las unidades anaeróbicas legalmente inscritas que forman parte de un sistema de tratamiento de aguas residuales sí quedan registradas ante el Ministerio de Salud de Costa Rica.

La tecnología empleada en el aprovechamiento del biogás es sobre todo la desarrollada localmente por medio de emprendimientos o la adaptación de la tecnología de gas licuado a propano con adaptaciones a biogás.

1.1.4 Referencias bibliográficas

Castillo, G. (1980). Manual de Biogás. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

AsoBiogás (Asociación Costarricense de Biogás). 2017. Potencial de producción de metano en Costa Rica. San José, Costa Rica.

Botero, R; Preston, T. 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Sin publicar.

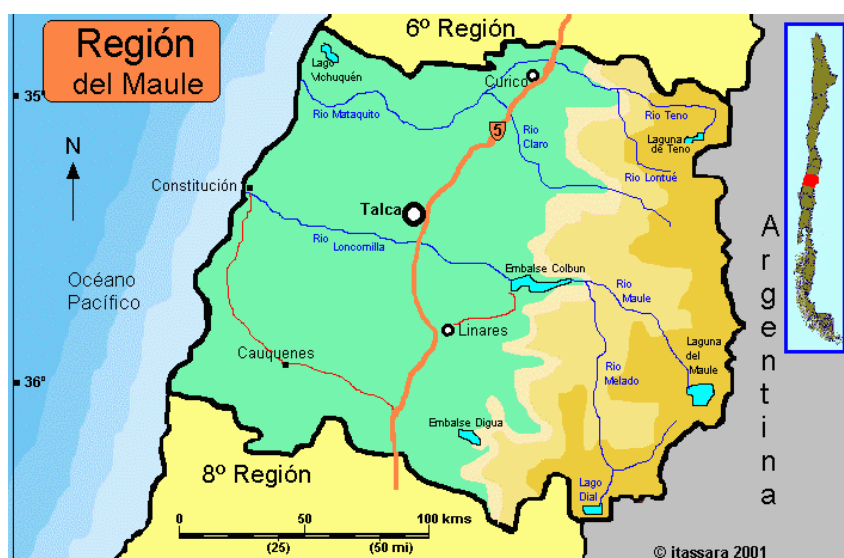
Instituto Meteorológico Nacional. s.f. Costa Rica logra 75 días usando energías 100% renovables. (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 22 enero 2023. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/news/costa-rica-logra-75-dias-usando-energias-100-renovables/>

1.2 Registro de biodigestores domiciliarios en uso en Chile, modelos, contexto y empleos del biogás y del efluente

Autora: Mariela Pino

En Chile, en comparación con lo sucedido en otros países de América Latina, aún no se ha extendido el establecimiento de biodigestores domésticos (2021), lo que tiene varias explicaciones. El biodigestor de manga plástica, el más popular de la región, no funciona en Chile por dos razones principales: la primera guarda relación con la temperatura del país y sus fluctuaciones diarias y estacionales, así como con sus zonas muy lluviosas, de baja radiación solar; mientras que la segunda es que cuanto más frío hace, se vuelve más conveniente encender una gran estufa de leña (ilustración 8) para cocinar y calentar las viviendas, escuelas, oficinas, etc.

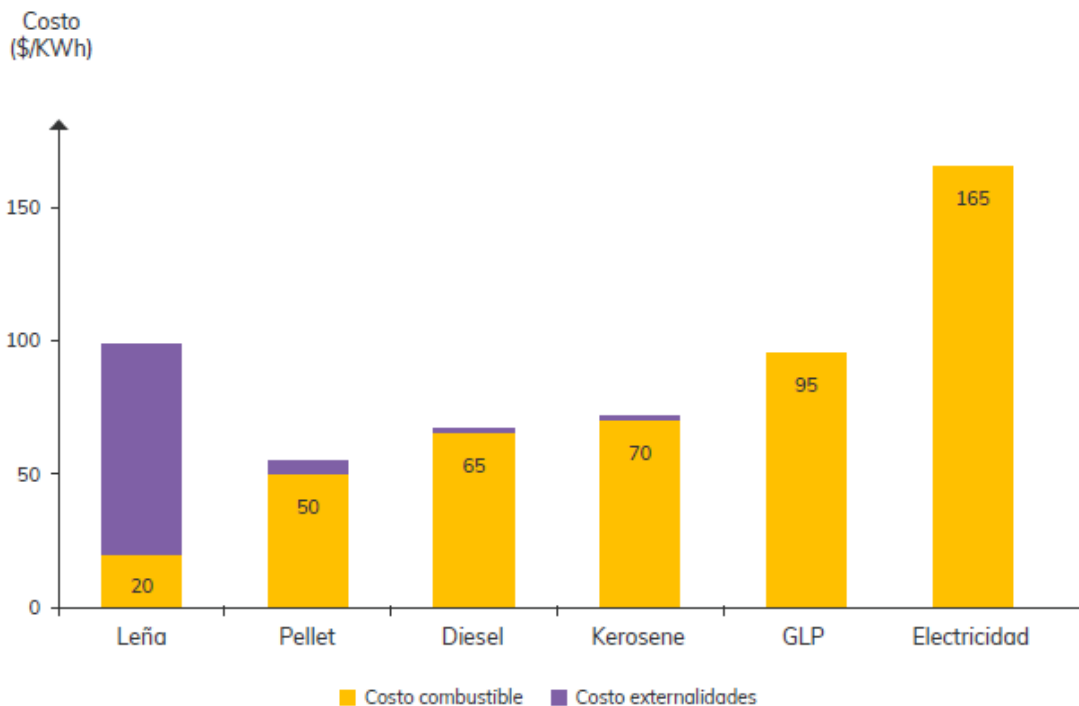
Ilustración 8. Mapa de las 15 regiones de Chile, con la región del Maule destacada



Fuente: Chile Turismo. 2020, p.1

Desde la región del Maule hasta el sur del país, entre todos los combustibles empleados en la calefacción, la leña sigue siendo el combustible más barato en Chile (USD 0.025/kWh). Debido a su alto grado de humedad, esta emite mucho humo y material particulado; sin embargo, considerando las consecuencias negativas de su uso (afecciones respiratorias asociadas a la inhalación de material particulado a partir de su uso en húmedo), su valor promedio se multiplica por 5 y se estima en USD 0.12/kWh, que es prácticamente el mismo valor del GLP (USD 0.118/kWh) (RedPE 2020). Esto significa que existe un costo oculto que los usuarios terminan pagando tarde o temprano, debido a la calidad del aire que respiran constantemente, con efectos nocivos en su salud (gráfico 1, ilustración 9).

Gráfico 1. Costos de los diversos combustibles disponibles en la zona sur de Chile



Fuente: Tomado de RedPE 2020: p.47

Ilustración 9. Mujer cocinando y calefaccionando su casa con leña



Fuente: Tomado de Cocinarte Chile, 2010: párr.6.

Además, la densidad poblacional ha sido relativamente baja en un espacio geográfico donde, a diferencia de la mayoría de los países latinoamericanos, en los últimos años Chile ha aumentado la cantidad de hectáreas de bosques nativos y de plantaciones forestales de especies exóticas (pino y eucalipto). Si bien esto puede deberse al aumento del catastro, en la zona del país donde más leña se usa esta sigue estando disponible. Por otro lado, no presenta restricciones de uso, según la normativa legal y ambiental vigente y, con base en ello, la producción es mayor a la demanda (RedPE 2020). En el país el consumo de leña seca es promovido por varias instituciones, a través de una gran cantidad de documentos y campañas enfocadas en la utilización de leña certificada, con valores de humedad máximos de 25 % (Ministerio de Energía 2014); no obstante, en general, esta leña es la menos utilizada.

Por otro lado, cuando se trata de resolver, apoyar o contribuir al desarrollo, las familias que componen el segmento de la agricultura familiar campesina comúnmente reciben asistencia fundamentada sobre todo en soluciones tecnológicas. Cuando hablamos de necesidades básicas, se abordan problemas asociados a la productividad de la pequeña escala, ya sea para la subsistencia o la generación de remanentes que les brinden la posibilidad de generar alguna fuente de ingresos a partir de la producción vegetal o animal local. Asimismo, se han llevado a cabo iniciativas enfocadas en la sostenibilidad ambiental.

P, ej., el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) trabaja junto con más de 150 000 familias campesinas agricultoras del país, poniendo a su disposición una serie de productos que son de utilidad en el medio rural, a menudo en condiciones de vulnerabilidad climática, económica o geográfica. Por lo tanto, en este escenario la entrega de productos e insumos a través de créditos y la realización de actividades de capacitación para mejorar las competencias de los usuarios son prácticas que se efectúan en todo el país en función de las necesidades locales. Servicios de bombeo de agua, sistemas de alimentación y calefacción animal y pautas de nutrición animal, entre otros, están disponibles bajo diversas metodologías de entrega y asistencia. En su mayoría, las instituciones pertinentes han abordado los problemas de formas muy convencionales, siendo incluso la producción orgánica o la agricultura agroecológica metodologías marginalmente promocionadas y disponibles únicamente cuando su demanda resulta evidente y se ejerce presión para obtenerlas.

Desde 2015 la Unidad Ambiental del INDAP existe solo en los lineamientos estratégicos (INDAP 2016). La utilidad, necesidad y visibilidad de un biodigestor, unidas a un espacio público institucional formal, han sido también marginales y se enmarcan en una práctica que podría resolver varios problemas a la vez: la pobreza energética, la reducción de la fertilidad de los suelos y la improductividad de los cultivos de traspatio. En 2015, en la vivienda de un pequeño productor de huevos, el INDAP inició la construcción del primer biodigestor piloto con estiércol de animales (cuyo pronóstico de uso era de 20kg/día o una cubeta de 20 l) para utilizar el biogás en la cocción de sus alimentos y el digestato, en el forraje para sus animales.

Los biodigestores establecidos en el país (que sirven a familias con ese perfil y a productores de pequeña escala o que forman parte de proyectos piloto con reactores de digestión anaeróbica de entre 2 y 5 m³) se desarrollaron debido a razones personales, institucionales o

didácticas con el objetivo de determinar el grado de funcionamiento de estas soluciones de valorización de material biodegradable en contextos urbanos, periurbanos y rurales.

Estas soluciones son diversas, desde modelos “hágalo usted mismo” a partir de una manga plástica, productos prefabricados de automontaje, hasta modelos más complejos en fibra de vidrio y mampostería e incluso invernaderos de adobe para mantener la inercia térmica. Se trata de proyectos autogestionados a los que no se les han hecho seguimientos sistemáticos que permitan entender las dinámicas de degradabilidad de los sustratos y conocer el grado de aprovechamiento logrado con ellos. Tampoco se ha estudiado el efecto de los efluentes del biodigestor. Por lo tanto, son experiencias que solo han demostrado que es factible transformar residuos orgánicos en biogás y digestato y que el gas se puede aprovechar para cocinar, calentar agua, encender motores, bombas y calefones, etc. Muchos biodigestores instalados y utilizados durante algunas temporadas dejaron de utilizarse al poco tiempo, ya que no se contaba con la asistencia requerida para su mantenimiento.

La ausencia de información sobre los resultados de los biodigestores en el plano local influye desfavorablemente en su promoción, difusión y masificación, impide sacar conclusiones con respecto a su utilidad en las diversas zonas del país, al costo-efectividad de las inversiones, a los obstáculos por superar y a la planificación para que los proyectos sean útiles, eficaces y ampliables y sean introducidos en la cartera de alternativas del mercado o promocionados como objeto de innovación, desarrollo rural, educación y desarrollo de competencias.

Desconocer cuánto biogás se produce, cuál es la composición del digestato, cuánto dinero o tiempo puede ahorrar una familia mediante su uso, cuántos residuos biodegradables son suficientes y cómo funcionan los biodigestores durante el verano o el invierno genera un vacío de información que impide tomar decisiones o medidas en torno a su implementación. Además, imposibilita entender las causas del fracaso del proyecto, por lo que los errores no se corrigen y todo el avance logrado hasta el momento en términos de gestión, pruebas, familiaridad con la tecnología e investigación se pierde y surge la incertidumbre, la desconfianza y una gran frustración.

El biodigestor de pequeña escala ha tenido más cabida debido a mentes visionarias, curiosas, autodidactas y previsoras de municipios, liceos y escuelas técnicas agropecuarias, casas particulares y grupos de pequeños productores emprendedores, interesados en cuidar el medio ambiente y en la educación.

Entre los proyectos en ejecución se incluyen los de:

1. Don David Pérez, de Coltauco (VI región de Chile). Se trata de una persona autodidacta, de las primeras en implementar estas soluciones en el país. En su casa instaló dos reactores con fines de autoconsumo de biogás, desarrollo de soluciones y producción de biol. Posee un biodigestor tipo hindú de campana flotante (de 5 m³ de volumen total) y un domo fijo (de 4 m³ de volumen total). Alimenta sus sistemas con excremento de animales, utiliza el biogás generado para cocinar y calefaccionar y ha probado su utilidad para bombear agua y generar electricidad. Don David siente entusiasmo por esta

tecnología, por lo que ha abierto las puertas de su casa a una gran cantidad de personas e instituciones para mostrarles lo que ha desarrollado.

2. La Bioconstructora de Mujeres, que instaló dos biodigestores en la zona de María Pinto, en la Región Metropolitana (RM). El primero es un modelo salchicha de 4 m³ de volumen total en manga plástica (PE de 100 micrones, en dos capas), dentro de un invernadero de adobe tapado con policarbonato para una familia que poseía vacas. La producción de biogás se efectuó sin problemas durante todo el año. La familia podía cocinar con él, por lo que prácticamente dejó de comprar cilindros de gas. El INDAP brindó financiamiento al proyecto, mientras que el municipio apoyó la iniciativa de mostrar y comprobar su funcionamiento en condiciones rurales; no obstante, tras un par de años de uso exitoso, el digestor se rompió y la familia no pudo arreglarlo ni contó con respaldo para hacerlo. Se realizaron intercambios con potenciales usuarios de otras regiones para que pudieran conocer el proyecto, pero no se tomaron datos sobre su funcionamiento, ni se efectuó un seguimiento del sistema, de su impacto en la familia o del grado de interés en él mostrado por la comunidad. El segundo biodigestor es un domo fijo (con un volumen total de 5 m³), construido con ladrillos y cemento para el tratamiento de las aguas negras de una casa de dos habitantes y el aprovechamiento de los residuos biodegradables de la cocina y del estiércol vacuno de algunos vecinos, que se utilizó sin problemas para cocinar durante varias temporadas, hasta que la casa quedó deshabitada. El digestato se distribuyó en el terreno, sin ser aprovechado como abono.
3. La comuna de Independencia, en la RM, en el marco del proyecto educativo “Parque para la Sustentabilidad⁵”, abierto a la comunidad. Se instaló un reactor, alimentado por residuos que constituían la fracción orgánica de un restaurante de la zona. Este dejó de generarlos y de contar con personal que pudiera atender y operar el biodigestor, debido a las cuarentenas efectuadas para evitar la propagación del síndrome respiratorio agudo producido por un coronavirus (COVID-19).
4. El Liceo Paula Jara Quemada, de la comuna de Recoleta (RM). Este, que ya había procurado incursionar en la lombricultura y proyectos de reciclaje de productos inorgánicos, tiene como objetivo educar en torno a temáticas ambientales. Por lo tanto, el biodigestor se suma a las otras iniciativas educativas, a fin de realizar un **manejo integral de residuos**⁶ del casino del liceo, como parte del reciclaje de nutrientes y la valorización energética de los residuos biodegradables de los alimentos de las alumnas. El proyecto se hizo viable gracias a una postulación a Comunidad Energética en 2020, en colaboración con Energía para Todos. Se instaló un biodigestor comercial importado desde Israel (Home Biogas) para disminuir los riesgos asociados a la construcción de un sistema desde cero. Este modelo tiene un gasómetro de 700 l en PVC y 1200 l de espacio para la digestión de los residuos, pero su uso adecuado es sobre los 20 °C, por lo tanto, se instaló dentro de un invernadero. Una de sus ventajas es su fácil instalación.

⁵ <https://www.fundacionbasura.org/parque-para-la-sustentabilidad/>.

⁶ <https://energiaparatodos.cl/gestion-integral-residuos/>.

Además, incluye el filtro de carbón activado, una válvula de despiche y una cocinilla, que se puede usar hasta dos horas por día; sin embargo, el hecho de no poder agitar el sustrato en su interior afecta al proceso. Inicialmente, el sistema se llenó con excremento de vacas y caballos, tras llenados periódicos con 6 l de FORSU (residuos de la cocina). Luego de tres meses se logró la operación e inercia, con lo que se puede calentar agua a diario durante una hora para preparar el desayuno de quienes trabajan allí.

5. Un pequeño agricultor y productor de huevos en Lampa, en la RM. En su casa se instaló un biodigestor de flujo continuo de 5 m³ de volumen total (tratamiento y acumulación de biogás) con un manga plástica de una capa (ilustración 10). La idea surgió luego de haber participado en una demostración para un grupo de pequeños agricultores, efectuada por el INDAP durante el 7.º Encuentro de la RedBioLAC, celebrado en Santiago. El proyecto fue financiado principalmente por dicho instituto, mientras que los propietarios de la casa consiguieron los materiales, la mano de obra y las herramientas para la instalación. El digestor se alimenta con excremento de animales (un balde de 20 l. de excremento de pollos, vacas y caballos). El biogás producido les sirve para cocinar y el digestato, para fertilizar la alfalfa con la que alimentan a sus vacas, caballos y en gran medida a sus gallinas ponedoras. Se puso en marcha en el verano de 2016 y desde entonces ha seguido funcionando de forma intermitente, pues en los meses fríos (de abril a septiembre) deja de generar suficiente biogás y, por lo tanto, suficiente presión para cocinar.

Ilustración 10. Biodigestor del INDAP instalado en la zona central, proyecto piloto de Lampa, período 2015-2016



6. IDMA Buin, en la RM. Este proyecto no prosperó, aunque se tenía la intención de instalar un biodigestor con fines educativos. El sistema para mantener la inercia térmica presentaba un diseño deficiente: se planificó el uso de tuberías de polipropileno que, en comparación con las de PVC, presentan hasta 20 % menos pérdida de calor, lo cual, en este caso, resultó desfavorable, por lo que no fue posible avanzar con el proyecto.

7. Un hotel *boutique* de Santiago (RM). Se adquirió un biodigestor comercial, gracias al interés en la sostenibilidad y la visión de una de las personas clave en el funcionamiento del hotel, quien lo compró en línea y lo instaló sin la suficiente capacitación o asesoría por parte de la empresa. Evidentemente, el sistema fue subdimensionado, ya que se adquirió un biodigestor para uso doméstico, pero con fines comerciales. El hotel tiene 120 habitaciones y, por lo tanto, el reactor resulta insuficiente para procesar todos los residuos orgánicos, mientras que el biogás generado no da abasto para atender la demanda del hotel. Por lo tanto, este esfuerzo no cumplió las expectativas de la gerencia y se desistió de su empleo. Además, la producción de digestato con un enfoque turístico en un espacio urbano tan reducido no se abordó de manera adecuada y se convirtió en una molestia.
8. Escuelas rurales de la región de la Araucanía (VIII región). La instalación de tres biodigestores educativos⁷ constituye un proyecto piloto desarrollado por la Universidad Católica de Chile (ilustración 11). Su objetivo es educar y extraer valores de experiencias rurales asociadas a la educación básica (de niños de entre 6 y 14 años) de escuelas ubicadas en entornos agrícolas, a fin de probarlas, adaptarlas, desarrollarlas y difundirlas.

Ilustración 11. Prototipo de biodigestor educativo en invernadero para escuelas



En este proyecto los mismos alumnos podían usar el digestato en la huerta de la escuela o llevarlo a las huertas de sus hogares, para lo cual debían alimentar el biodigestor con la fracción orgánica de la cocina de la escuela. Los biodigestores de geomembrana, con diseños lúdicos en forma de insectos o animales, eran de flujo continuo y se instalaban

⁷ <https://www.biodigestoreseducativos.com/>.

dentro de invernaderos para mantener la inercia térmica y protegerlos de daños mecánicos. La puesta en marcha de los digestores se efectuó con estiércol vacuno y, posteriormente, se utilizó la fracción biodegradable de las preparaciones de alimentos de las cocinas de las escuelas.

Se espera que la iniciativa tenga éxito en el largo plazo, para lo cual a los profesores interesados en la dinámica del biodigestor y en enseñarla se les otorga un permiso y se les asigna un horario.

En la época invernal dos digestores entraban en latencia, lo que daba paso al funcionamiento primaveral y durante todo el verano hasta el otoño, dadas las temperaturas de esta zona austral del país (latitud: -39.2667 y longitud: -72.2167 39° 16'). Al poco tiempo se dejó de utilizar el tercer reactor.

El modelo funcionó bastante bien, hasta que, debido a las cuarentenas, los alumnos dejaron de asistir a las escuelas y, por consiguiente, se interrumpió la alimentación de los biodigestores.

9. La región de Los Ríos (XVI región). Dentro de este proyecto se instalaron 53 biodigestores de un mismo modelo en diversas zonas climáticas de la región (2015-2021). Este proyecto se basó en una experiencia de 2015, en la que se desarrollaron tres sistemas en diversos nichos ecológicos: la costa (Máfil), la zona central (San José de la Mariquina) y hacia la cordillera (lago Riñihue), con el objetivo de conocer las influencias térmicas en los biodigestores. El proyecto buscaba generar capacidades entre el personal del INDAP y ampliar la utilización de los biodigestores por parte de los pequeños agricultores de la zona en su propio beneficio, por medio del aumento de los recursos para el núcleo familiar, principalmente combustible y abono.

Dentro del proyecto se desarrolló un modelo en fibra de vidrio que permite conservar la inercia térmica de los reactores, manteniéndolos dentro de un cubo de policarbonato transparente que deja pasar la radiación solar y permite la ganancia térmica de los reactores en fibra de vidrio negra (ilustración 12). Por otro lado, el sistema cuenta con un gasómetro que proporciona la presión adecuada para emplear la cocinilla a biogás sin problemas de suministro y poder calorífico. El modelo es de flujo continuo, con un sistema de llenado y vaciado manual, similar a un modelo *batch*, lo que posibilita la alimentación regular.

Si bien aún no se han cuantificado los valores de la producción de biogás en función del sustrato utilizado, la degradación de la materia orgánica, ni las características del digestato, los sistemas se mantuvieron funcionando durante todo el año, a pesar de encontrarse en sitios con temperaturas promedio de 6.9 °C en julio, el mes más frío del invierno (mínimo 4.2 °C y máximo 10.3 °C)⁸. Cabe destacar que las temperaturas se mantienen desde junio hasta septiembre (ilustración 13). Además, se requiere **implementar un sistema de registro técnico** para cuantificar el impacto de los reactores.

⁸ <https://es.climate-data.org/americadel-sur/chile/xiv-region-de-los-rios/san-jose-de-la-mariquina-148894/>.

Ilustración 12. Contenedor de policarbonato transparente

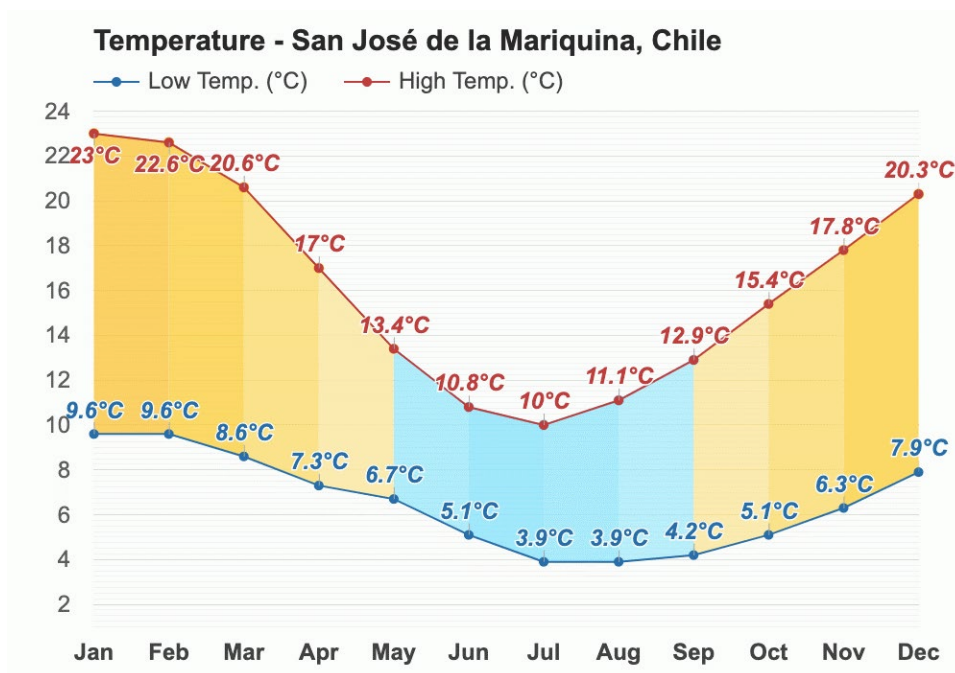


Nota: Ayuda a mantener por varios meses la inercia térmica del reactor en zonas de alta humedad y baja radiación solar.

Según los usuarios, la información de la que disponen es solo cuantitativa. Durante el invierno la producción de biogás se reduce un poco y se le da menor alimentación, pero el resto del año aumenta y les permite cocinar o llevar a cabo actividades productivas como teñir lana, preparar alimento para los animales y producir agua caliente sanitaria en calderas, así como actividades turísticas, etc. En verano han dejado de usar leña para cocinar y de comprar cilindros de gas. El ahorro estimado en la compra de gas o leña por familia es de aproximadamente USD 200/año.

31

Ilustración 13. Promedio histórico del clima en la región de Los Ríos, Chile



Fuente: Tomado de Weather Atlas, 2023:p.1

A octubre de 2021 el proyecto se ha llevado a cabo en la región de Los Ríos con la guía y la asistencia del INDAP (Miguel Ángel Leal) y el Programa de Desarrollo Local (PRODESAL) (César Altamirano), en el marco del apoyo a inversiones que el INDAP ofrece a pequeños agricultores que crían ganado bovino y producen hortalizas y productos orgánicos.

Para lograr el éxito en el 85 % de los casos, el equipo técnico y los usuarios consideran clave los siguientes aspectos:

- La adecuada selección de las familias que instalarán los sistemas, que deben aportar (trabajo y recursos) durante su planificación, instalación y operación y considerar la agricultura familiar campesina como una posible fuente de ingresos.
- El trabajo con mujeres productoras de alimentos, ya que estas emplean el digestato del reactor en la fertilización de los suelos y el mejoramiento de la productividad de sus tierras e invernaderos. Contar con un biodigestor contribuye a aumentar su empoderamiento en sus proyectos (ilustración 14).
- En la agricultura familiar campesina que trabaja en el campo del turismo estos sistemas encuentran también un buen nicho, debido a su vínculo con el cuidado del medio ambiente y, en general, con la producción de alimentos frescos y orgánicos.
- La realización de actividades de capacitación demostrativas en sitios donde ya se estableció un biodigestor, a fin de mostrar su funcionamiento y entender sus necesidades operativas reales. Se llevaron a cabo giras técnicas y visitas de grupos de potenciales usuarios de otras regiones.
- La utilización directa del digestato o su incorporación en el compostaje.
- La eliminación de la mala fama de los sistemas y el intercambio de conocimientos entre los usuarios para identificar mejores prácticas.

32

Ilustración 14. Susana de Lanco utiliza el biogás en sus artesanías y el digestato, en su huerta



Fuente: Leal Rosas, 2021⁹

⁹ Fotografías donada por Miguel Angel Leal Rosas

1.2.1 Referencias bibliográficas

- Cocinarte Chile. (2010) Chiloé Foto Anabella. (en línea). Chile, Cocinarte Chile. Consultado 12 de enero de 2023. Disponible en <https://cocinartechile.blogspot.com/2010/04/esta-el-horno-para-pan.html>
- INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario, Chile). 2016. Diagnóstico exploratorio de la acción de fomento de INDAP en materia de sustentabilidad ambiental (en línea). Santiago. 35 p. (Serie Estudios y Documentos de Trabajo, n. 7). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/32336/Diagnostico%20exploratorio%20de%20la%20acci%c3%b3n%20de%20fomento%20de%20indap%20en%20materia%20de%20sustentabilidad%20ambiental%2001-03-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Ministerio de Energía. 2014. Guía práctica para el buen uso de la leña: leña seca-leña eficiente (en línea). Santiago, Chile. 86 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/512>.
- RedPE (Red de Pobreza Energética, Chile). 2020. Caracterización del mercado de la leña en Chile y sus barreras para la transición energética (en línea). Santiago, Chile. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/344631431_Caracterizacion_del_mercado_de_la_leña_en_Chile_y_sus_barreras_para_la_transicion_energetica
- Chile Turismo. 2022. Región del Maule identificada en el país. (en línea). Chile, Chile Turismo. Consultado 11 de enero de 2023. Disponible en www.chileesturismo.blogspot.com.
- Weather Atlas, 2023. Clima y previsión meteorológica mensual San José de la Mariquina, Chile. (en línea). Chile, WA. Consultado 12 de enero de 2023. Disponible en: <https://www.weather-atlas.com/es/chile/san-jose-de-la-mariquina-clima>

1.3 Estado actual de los biodigestores en Colombia

Autora: Andrea Tamayo

En este capítulo se presenta una aproximación del estado actual de los biodigestores instalados en Colombia. Asimismo, se aborda el uso potencial de esta tecnología en el sector agroindustrial y de grandes generadores.

Además de examinar este tema en el plano doméstico, revisar su actualidad desde el enfoque del Estado permitirá determinar los avances y retos para obtener esquemas más regulados e incluso subsidiados por este. Por otro lado, la información suministrada por la academia y las organizaciones de base comunitaria permite medir el pulso de las plantas de biogás de mediana y pequeñas escalas, ya que, a pesar del esfuerzo dirigido a dar seguimiento a estas iniciativas, se carece de datos sólidos que permitan llegar a una conclusión general.

De conformidad con lo anterior, esta sección del capítulo se desarrolla en tres partes: 1) Flujos de biomasa residual, 2) Metabolismo energético en Colombia y 3) Aprovechamiento energético

y material de la biomasa en la pequeña escala y sus usos para lograr la soberanía energética y material de las comunidades.

En Colombia la aplicación apropiada de la tecnología de biogás resulta favorable, dadas las condiciones del trópico y la cantidad de biomasa residual disponible. Especialmente en el sector rural, esta alternativa de tratamiento se podrá considerar en la generación eléctrica, la venta de excedentes y el aprovechamiento de la energía térmica; p. ej., se estima que en los sectores avícola y porcícola el potencial técnico de generación de biogás es de aproximadamente 5700 TJ/año (UNAL y TECSOL Ltda. 2018). Además, se han generado herramientas de análisis de viabilidad de la valoración energética de los residuos orgánicos urbanos agropecuarios, como el *Modelo conceptual para el cálculo de la viabilidad de proyectos de valorización de residuos biodegradables*, diseñado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (UPME 2018). En la actualidad se trabaja en el ámbito interinstitucional en la estructuración de la Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada (NAMA) sobre biogás, que integra diferentes biomásas residuales, en colaboración con los ministerios de Energía, Agricultura y Vivienda, bajo la coordinación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Saer y González 2019).

No obstante, se carece de información detallada sobre el potencial de generación de los pequeños y medianos productores, dado que los pronósticos se han realizado con respecto a empresas con grandes generaciones de biomasa residual. Dar seguimiento al número y los tipos de biodigestores de pequeña escala instalados, sus diseños por ecorregiones, los sustratos tratados, su estado de operación, los modelos de distribución, los retos que plantea su uso y el financiamiento requerido aún constituye todo un desafío.

1.3.1 Flujos de biomasa residual

En el país se generan grandes cantidades de biomasa derivada de productos agrícolas que se desaprovechan debido al desconocimiento sobre los procesos y las tecnologías, la falta de acceso a los mercados y la ausencia de innovación en la generación de productos de valor agregado (Bueno *et al.* 2018). En cuanto a los residuos domésticos, se estima que se desechan cerca de 18 000 000 t, compuestas por residuos orgánicos (59 %), otros residuos (16 %), plástico (13 %), papel y cartón (9 %), vidrio (2 %) y metal (1 %) (OCDE 2017).

En 2010 se publicó el estudio *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*, editado por la UPME, donde se identifican y caracterizan fisicoquímicamente los principales residuos de diferentes sectores y los factores de generación con respecto al producto principal (UPME, 2018), el cual ha sido el punto de partida para dar valor al potencial de aprovechamiento de la biomasa residual. Se estima que la economía colombiana produce anualmente cerca de 178 000 000 t de biomasa residual proveniente de cultivos agrícolas (41 %), biomásas residuales pecuarias (59 %) y el sector residencial (<1 %) (UPME 2018). Actualmente esta biomasa se reintegra de manera poco técnica en los cultivos y, en el mejor de los casos, pasa por un proceso de compostaje para aprovechar su potencial nutricional. En la tabla 1 se presentan los principales residuos.

Tabla 1. Sectores y biomásas residuales en Colombia

Sector	Residuo	Residuos (t/año)
Pecuario		
Avícola	Estiércol	6 518 795
Porcícola	Estiércol	2 745 392
Bovino	Estiércol	83 497 181
Agrícola		
Arroz	Paja	2 078 073
Banano	Fruta de rechazo	2 067 945
Pulpa de café	Pulpa	298 996
Mucílago de café	Mucílago	102 243
Borra de café	Borra	18 532
Maíz	Caña	912 659
Palma de aceite	Laguna de oxidación	6 709 985
Plátano	Fruta de rechazo	23 816 051
Caña de azúcar	Bagazo	6 972 609
Caña panelera	Bagazo	364 066
Urbano		
Residuos sólidos urbanos (RSU)	Residuos sólidos orgánicos urbanos	9 845 875
Lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)	Lodos	19 422 647
Industrial		
Lácteo	Grasas, lodos	37 125
Cervecería	Lodos	789 230
Destilería	Vinazas	9 587 333
Matadero	Rumen	103 581

Fuente: Elaborado con base en UNAL y TECSOL Ltda. 2018.

Con el fin de optimizar los rendimientos de los recursos, en la Estrategia Nacional de Economía Circular 2019 (Saer y González 2019) se propone el empleo de la biomasa residual no disputable -no disputa con otros fines industriales o de protección de suelos y aporte directo- en la producción de biogás, iniciando con la creación de un sistema nacional de aprovechamiento de la biomasa residual que consolide toda la información sobre la oferta de biomasa, las tecnologías de compostaje y la certificación de calidad del producto. Para este fin se vienen celebrando reuniones entre los sectores industriales, el de aprovechamiento y la academia,

junto con el Ministerio de Medio Ambiente y otras dependencias gubernamentales en la Mesa Nacional para el Aprovechamiento de la Biomasa Residual (conformada de manera oficial en junio de 2021)¹⁰.

1.3.2 *Metabolismo energético en Colombia*

En Colombia aún existen zonas no interconectadas, esto es, lugares donde aún no existe oferta eléctrica interconectada; por lo tanto, aun se deben promover e implementar soluciones energéticas a través de esquemas eficientes, viables financieramente y sostenibles en el largo plazo para satisfacer las necesidades energéticas de los hogares y las unidades productivas. Estas zonas se caracterizan por ser dispersas (de baja densidad poblacional), por presentar un bajo nivel de consumo de energía promedio y una reducida capacidad de pago y por albergar comunidades étnicas y campesinas, así como zonas protegidas. Son comunidades que dependen de forma significativa de la leña para la cocción de los alimentos, lo que implica impactos ambientales como la deforestación.

Las fuentes de energías renovables no convencionales son fundamentales para asegurar la circularidad del flujo de energía. La biomasa es una fuente de energía renovable que se puede aprovechar aplicando tecnologías como la DA. La ley 1715 establece parámetros de aprovechamiento energético de la biomasa como fuentes no convencionales de energía renovable.

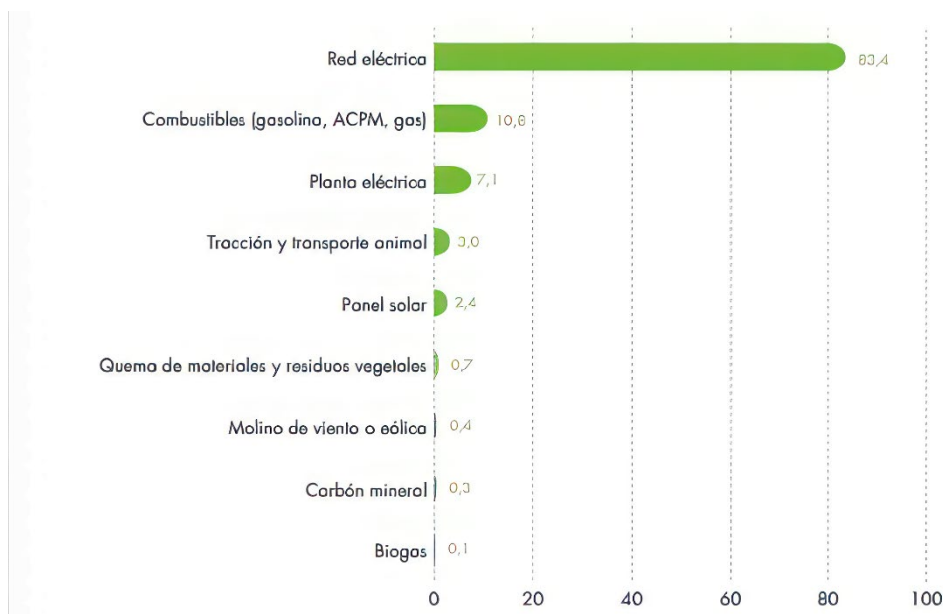
1.3.3 *Aprovechamiento energético y material de la biomasa en la pequeña escala y sus usos para lograr la soberanía energética y material de las comunidades*

En Colombia el Estado y la academia han efectuado estudios dirigidos a estimar el potencial de producción de biogás a partir de la biomasa residual disponible, lo que ha permitido el diseño de planes estratégicos y de la normativa actual. Existe evidencia dispersa sobre la instalación de estos sistemas de aprovechamiento en producciones agrícolas y pecuarias en el ámbito rural, por lo que se debe seguir avanzando en su diagnóstico y caracterización para conocer la cantidad de biodigestores, los tipos de biomasa y los responsables de la difusión de los resultados de estas experiencias, a fin de implementar estrategias en el mediano plazo.

Según el Censo Nacional Agropecuario de 2016, en el país se han realizado solo dos estudios de este tipo. En el 32.8 % de las unidades productivas de la zona rural censada, los productores declararon que usan energía en el desarrollo de sus actividades agropecuarias. Como se muestra en la Gráfico 2, dentro de las unidades censadas el 0.1 % reportó el uso de biogás como fuente de energía, lo que demuestra la existencia de sistemas de DA instalados en el país.

¹⁰Véase su protocolización en el siguiente enlace: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/mesa-nacional-de-aprovechamiento-de-masa-residual/>.

Gráfico 2. Distribución de las unidades productivas en la zona rural censada, según el tipo de energía utilizada en el desarrollo de las actividades agropecuarias.



Fuente: Tomado de DANE 2016:89

En la tabla 2 se presenta la cantidad de unidades productivas que en 2016 empleaban biogás como fuente de energía, así como su distribución. Con esta información se verifica la existencia de sistemas de DA a lo largo del territorio nacional, aunque se desconoce el tipo de biodigestores y la biomasa residual que emplean, entre otras variables que posibilitan su caracterización.

Tabla 2. Biogás utilizado como fuente de energía para el desarrollo de las actividades agropecuarias

Departamento	Número de unidades productivas rurales que emplean el biogás en el desarrollo de sus actividades agropecuarias
Total nacional	912
Antioquia	86
Arauca	1
Atlántico	7
Bogotá D. C.	3
Bolívar	13
Boyacá	98
Caldas	24
Caquetá	14
Casanare	12
Cauca	51
Cesar	15
Chocó	16
Córdoba	26
Cundinamarca	82

Guainía	1
Huila	60
La Guajira	8
Magdalena	12
Meta	18
Nariño	84
Norte de Santander	26
Putumayo	12
Quindío	30
Risaralda	23
Santander	31
Sucre	25
Tolima	82
Valle de Cauca	50
Vaupés	1
Vichada	1

Fuente: Elaborado con base en DANE 2016: p.86

Colombia es un país histórico en términos del desarrollo y la difusión de biodigestores entre los pequeños y medianos productores agropecuarios. En 1986 el Dr. Thomas Preston publicó el primer manual de instalación de biodigestores plásticos a partir de pequeñas experiencias previas en Etiopía y Australia, con base en el cual se inició la difusión de esta tecnología.

En los años noventa el CIPAV impulsó la democratización de los biodigestores tubulares plásticos y a principios del siglo XXI la Fundación para la Producción Agropecuaria Tropical Sostenible tomó la iniciativa de implementarlos, brindar capacitación a los instaladores y desarrollar investigaciones sobre los biodigestores tubulares plásticos. En 2012 esta fundación organizó un encuentro entre actores para la formación de la Red Colombiana de Energía de la Biomasa de Colombia (RedBioCol, conformada hoy por 80 distintas entidades, entre ellas ONG, organizaciones de base, universidades, movimientos sociales, asociaciones de campesinos e indígenas y colectivos urbanos, la cual tiene como objetivo contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad colombiana mediante la promoción del aprovechamiento energético de los residuos orgánicos por medio de acciones de articulación, gestión del conocimiento e incidencia sociopolítica y ambiental en los territorios.

La RedBioCol busca contribuir a la soberanía energética y alimentaria del país a través del acceso y el uso sostenible de las tecnologías a partir de la biomasa. Es impulsada por personas y organizaciones que se conectan y comunican en torno a esta materia (RedBioCol 2021). Desde su perspectiva y según su experiencia en el territorio, entre las tecnologías apropiadas y aplicadas para lograr la soberanía energética se encuentran los biodigestores, la gasificación de biomasa seca y los sistemas integrados agroecológicos.

La tecnología más usada en la pequeña y mediana escala son los biodigestores plásticos de flujo continuo, que usan la biomasa residual de la producción pecuaria de especies menores, presente en la mayoría de las fincas de las comunidades rurales y periurbanas. En su fabricación

se usan materiales de bajo costo como PVC y plásticos de polietileno comercial. En Colombia se puede conseguir plástico tubular calibre 8" con protección contra los rayos ultravioleta, tiras de neumáticos, tubos de PVC de 4", aceite, estacas, alambre, pegamento y limpiador de PVC, bolsas plásticas negras de 10 kg para tapar los tubos y lona, entre otros materiales mencionados en la publicación *Biodigestores tubulares: guía de diseño y manual de instalación* (Martí Herrero 2019).

Entre algunas de las comunidades que han avanzado hacia la instalación de los biodigestores se incluyen la Asociación de Mujeres y Familias Campesinas de la Vereda Quitasol del municipio de Guadalupe Santander, que emplea un biodigestor tubular alimentado con estiércol de cerdo y mucílago y lixiviados del café. Al respecto, manifiesta que "El biogás permite el cuidado de los recursos naturales al no usar la leña, mejorando los ingresos de la familia. Además, en la salud, para las mujeres principalmente, ya que no hay humo; además el uso del biol para el cultivo de café, plátano, cítricos, pastos y huertos mejorando la productividad y los ingresos" (Claudia Gómez, 2021¹¹). La Asociación de Familias Productoras Rurales, de la vereda Morario del municipio de Guapota, Santander, manifiestan que "Se han instalado unos 40 biodigestores, mejorando la calidad de la vida de las familias, mejorando los ingresos de las familias" (UTA 2021).

En 2018 la RedBioCol estableció una estrategia relacionada con la difusión e instalación de biodigestores a lo largo del país y para 2020 ya existían reportes puntuales del establecimiento de algunos de estos sistemas, como el de la vereda El Toche Alto, corregimiento El Convenio, municipio el Libano, departamento del Tolima, donde ocho familias dedicadas a la cría de cerdos desarrollaron tres biodigestores plásticos tubulares de flujo continuo que, además de contribuir a reducir la contaminación, generan otras ventajas para la salud humana y disminuyen los costos relativos al uso de combustibles y fertilizantes, entre otros (Aponzá 2020) (ilustración 15).

39

Ilustración 15. Biodigestor inflado



Nota: listo para conectar la salida de biogás a la tubería de conducción, ubicado en la vereda El Toche Alto, corregimiento El Convenio, municipio de Libano, departamento de Tolima.

Fuente: Tomado de Aponzá, 2020: párr.1.

¹¹ Gómez, C. 2021. Entrevista sobre biogás. Colombia.

Cabe destacar la experiencia de la Asociación de Productores Indígenas y Campesinos de Riosucio Caldas, que cuenta con más de 300 sistemas instalados dentro de un proceso propio y original, mediante el cual sus asociados pueden acceder a biodigestores tubulares de plástico y al financiamiento necesario por medio de un fondo rotatorio y disponen de instaladores propios (UPME 2019).

Otro ejemplo es el de la Asociación de Organizaciones Campesinas y Populares de Colombia, que en los últimos dos años ha formado promotores a través de escuelas campesinas, difundiendo la tecnología y obteniendo el apoyo del Ministerio de Agricultura y de organizaciones internacionales para instalar más de 100 unidades de cerdos, cada una con un biodigestor tubular en el departamento de Santander (UPME 2019).

Yerli García Golu (2019) publicó un trabajo intitulado *Diagnóstico general del estado de los biodigestores en la región del Ariari, municipios de Puerto Gaitán y Villavicencio del departamento del Meta*, según el cual en ese momento no existía información documentada acerca de la cantidad de biodigestores instalados, por lo tanto, se desconoce dónde, cuándo y quiénes instalaron los biodigestores; no obstante, se verificó la existencia de 47 biodigestores y se caracterizó a 32 de ellos, de los cuales cuatro pertenecían a empresas y 28, a fincas. De estos últimos solo 19 se encontraban en operación. La mayoría de los biodigestores son tubulares de bolsa (89 %) (ilustración 16), de caneca (tambor o depósito) en serie (7 %) (ilustración 17) y de caneca (4 %) (ilustración 18). Las razones por las cuales se solía optar por biodigestores tubulares, normalmente de plástico de polietileno de alta densidad, es porque son más económicos, más fáciles de instalar y son los recomendados por asesores u otros productores.

Ilustración 16. Biodigestor tubular ubicado en la finca La Peluza, departamento de Meta,



Ilustración 17. Biodigestores tipo caneca en serie, Reserva Natural Rancho Camaná, departamento de Meta, Colombia



Ilustración 18. Biodigestores tipo caneca en la finca Moniyamena, departamento de Meta, Colombia



Fuente: Tomado de García Golu, 2019: 52

Los biodigestores instalados, de 12 m de largo y 1 m de ancho en promedio, tienen un volumen que oscila entre 0.2 m³ y 12.3 m³.

Para la ejecución del 52 % de estos proyectos se contó con algún tipo de financiamiento externo al grupo familiar, mientras que el porcentaje restante se llevó a cabo con recursos propios.

De acuerdo con el diagnóstico, el 80 % de los encuestados utilizaba el biodigestor en el manejo de excretas y la producción de abonos, mientras que el 77.4 % lo empleaba en la producción de biogás. El 53.6 % manifestó que el biol o bioabono resultante de la degradación de la materia orgánica en el biodigestor le había traído beneficios a su finca, debido a la calidad y disponibilidad de fertilizante. Se produjeron cambios muy notorios en los cultivos, como plantas con mejores características, frutos más grandes, pastos más sanos y verdes y un mayor crecimiento vegetativo, además del ahorro que supuso reducir la compra de fertilizantes químicos, difíciles de adquirir para muchas familias.

Entre los principales beneficios de la implementación de un biodigestor en las fincas se incluyen:

- a. La no utilización de leña para la cocción de los alimentos, ya que esta actividad conlleva tiempo y esfuerzo y contamina el medio ambiente.
- b. La reducción en la compra de GLP, un producto muy costoso cuyo transporte hasta las fincas resulta muy engorroso.
- c. La disminución de gastos, ya que el biogás se emplea como fuente de energía.
- d. La utilización del biol como abono para los cultivos y tratamiento para los suelos.
- e. La reducción en el uso de fertilizantes químicos, que son costosos y dañinos para el medio ambiente.
- f. El manejo adecuado de las heces, que disminuye los malos olores y evita la contaminación del medio ambiente.

Se han presentado algunos inconvenientes para el funcionamiento de los biodigestores, entre ellos:

- a. Daños por la caída de árboles, entre otros accidentes, debido a la escasa protección de los biodigestores.
- b. Una menor disponibilidad de residuos para producir la cantidad de biogás y biol requerida, debido a que la producción porcina sufrió una baja como resultado de la implementación de nuevos mercados.
- c. La rotura del plástico debido a agentes externos como el sol y los animales, entre otros.
- d. La generación de malos olores por fugas en el biodigestor.
- e. La poca producción de biogás en algunos biodigestores.

Por otro lado, en 2019, en el departamento de Valle del Cauca, la Corporación CVC, en convenio con la Alcaldía del Municipio de Bolívar, construyó 14 biodigestores en zonas rurales de este municipio, con el objetivo de reducir el impacto de los vertimientos de la actividad porcícola de medianos y pequeños productores y de contribuir al mejoramiento de su calidad de vida.

Ilustración 19. Biodigestor tubular instalado en el municipio de Bolívar, Valle del Cauca



Fuente: Tomado de Comunicaciones CVC, 2019, párr.1

De conformidad con la información recabada, en Colombia uno de los retos por enfrentar es el establecimiento de la línea base del estado actual de los sistemas de biodigestión. Hoy se conoce su alto potencial, pero aún se debe trabajar en la apropiación de esta tecnología en la

pequeña y la mediana escalas, conocer sus desafíos y la forma en la que se han enfrentado y avanzar hacia la generación de estrategias que permitan materializar las metas de producción y los beneficios en los territorios.

1.3.4 Referencias bibliográficas

- Aponzá, O. 2020. Día de campo en la construcción de un biodigestor plástico tubular de flujo continuo en la vereda El Toche Alto, corregimiento El Convenio, municipio el Líbano, departamento del Tolima de la organización Pastoral Social (en línea). Colombia, RedBioCol. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://redbiocol.org/seguimos-sembrando-biodigestores-por-colombia-desde-el-departamento-del-tolima/>.
- Bueno, J; Hoyos, J; Mesa, C. 2018. Reporte sobre la productividad del sector agroalimentario de Colombia, Australia y Nueva Zelanda como referentes para su transformación. Embajada de Colombia en Australia.
- Comunicaciones CVC. (28 de mayo de 2019). Colombia, CVC. Obtenido de Sistemas de biodigestores para familias campesinas de Bolívar. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.cvc.gov.co/biounion>.
- CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Colombia). 2019. Por una producción más limpia (en línea). Bolívar, Colombia. Consultado e3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.cvc.gov.co/biounion>.
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Colombia). 2016. Tercer Censo Nacional Agropecuario. Bogotá D. C., Colombia, MA.
- García Golu, Y. 2019. Diagnóstico general del estado de los biodigestores en la región del Ariari, municipios de Puerto Gaitán y Villavicencio del departamento del Meta (en línea). Tesis Ing. Villavicencio, Colombia, UNILLANOS. 111 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/1613/DIAGN%c3%93STICO%20GENERAL%20DEL%20ESTADO%20DE%20LOS%20BIODIGESTORES%20EN%20LA%20REGION%20DEL%20ARIARI%2c%20MUNICIPIOS%20DE%20PUERTO%20GAITAN%20Y%20VILLAVICENCIO%20DEL%20DEPARTAMENTO%20DEL%20META.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Martí Herrero, J. 2019. Biodigestores tubulares: guía de diseño y manual de instalación (en línea). Ecuador, RedBioLac. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Jaime-Marti-Herrero/publication/337064154_Biodigestores_Tubulares_guia_de_diseno_y_manual_de_instalacion_2019_J_Marti_Herrero/links/5dc34f10a6fdcc2d2ff7d067/Biodigestores-Tubulares-guia-de-diseno-y-manual-de-instalacion-2019-J-Marti-Herrero.pdf.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, Francia). 2017. Estudios económicos de la OCDE: Colombia: visión general (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.oecd.org/economy/surveys/Colombia-2017-OECD-economic-survey-overview-spanish.pdf>.

RedBioCol (Red Colombiana de Energía de la Biomasa). 2021. RedBioCol (en línea). Consultado 16 de enero de 2023. Disponible en www.redbiocol.org.

Saer, AJ; González, LE (coords.). 2019. Estrategia nacional de economía circular: cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio (en línea). Bogotá D.C., Colombia, MA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf.

Tobón Abello, AH. 2018. Análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cúpula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región norte de Colombia (en línea). Tesis Mag. Barranquilla, Colombia, UNINORTE. 135 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/8529/135399.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Tobón Abello, AH. 2018. Análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cúpula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región norte de Colombia (en línea). Tesis Mag. Barranquilla, Colombia, UNINORTE. 135 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/8529/135399.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

UNAL (Universidad Nacional de Colombia); TECSOL Ltda. 2018. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento: informe final. Bogotá D. C., Colombia, UPME. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1317/Informe%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia). 2018. INERCO, Colombia. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.upme.gov.co/ValoracionEnergeticaRSU/>.

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia). 2019. Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución: contrato UPME C-031-2019 (en línea). Bogotá, Colombia. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_sustitucion_progresiva_Lena.pdf.

UTA (Fundación para la Producción Agropecuaria Tropical Sostenible, Colombia). 2021. Testimonio de usuarios biogás (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.utafoundation.org/>.

1.4 Situación actual y distribución regional de las plantas de biogás en Cuba

Autores: Luis Cepero Casas, José Antonio Guardado y equipo Indio Hatuey.

1.4.1 Escala domiciliaria en Cuba

La compilación de la información sobre la historia del biogás en Cuba que conforma este capítulo fue coordinada por la **Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey” (EPPFIH)** y la **Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía (CUBASOLAR)**, con la colaboración de un grupo de investigadores y especialistas de las siguientes instituciones nacionales:

- El Centro Cristiano de Reflexión y Diálogo,
- El Centro de Investigaciones de los Bioalimentos,
- El Centro de Promoción y Desarrollo del Biogás (CPDB),
- El Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía,
- El Departamento Independiente de Energía del Ministerio de la Agricultura (MINAG),
- El Instituto de Investigaciones Porcinas (IIP),
- El MINAG,
- La Universidad de Santi Spíritus José Martí Pérez,
- La Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría,
- Usuarios y activistas del Movimiento de Usuarios del Biogás (MUB) (personas naturales),

Así como de las siguientes entidades de ámbito internacional:

- El Proyecto Agroenergía, financiado por la organización no gubernamental (ONG) OIKOS-Portugal y la Unión Europea (UE);
- Los esposos Turrini (apoyo financiero);
- El Proyecto Bioenergía, financiado e implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM);
- El Proyecto BIOMAS-Cuba, financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE); y
- La ONG BORDA (financiamiento del MUB).

Existe una disparidad de opiniones en cuanto al descubrimiento y la implementación de la tecnología del biogás en Cuba. Su origen se enmarca en la primera mitad del siglo XX (1940). En aquel momento se construyeron dos biodigestores con tecnología de cúpula fija para procesar los residuos de una industria cervecera, ubicada en el municipio Cotorro, en La Habana. Durante el período 1940-1970 se desconoce si se construyeron otros biodigestores en la isla; no obstante, a finales de la década de los setenta y en la primera mitad de los ochenta se construyeron más de 400 biodigestores de pequeña escala del tipo hindú (campana flotante), dentro de un programa del MINAG. Esta producción de biogás se destinaba fundamentalmente al alumbrado y la cocción de alimentos en vaquerías (lecherías); sin embargo, al no existir una adecuada estrategia de sensibilización, capacitación y estímulo para usar esta tecnología, no

se obtuvieron los resultados esperados de estas unidades productivas y, luego de un tiempo relativamente corto, los biodigestores fueron abandonados casi en su totalidad. Después de este incierto desarrollo, en los ochenta se dio un resurgimiento con un nuevo enfoque y un movimiento en desarrollo, demandado por diferentes sectores de la sociedad cubana y liderado por el Grupo de Biogás de Villa Clara, que más tarde se convirtió en el MUB.

Posteriormente, se efectuaron diversos intentos, caracterizados más por fracasos que por éxitos. A principios de los noventa se retoma la actividad, involucrando a un número mayor de territorios del país a través de un programa de difusión, dirigido a calificar a técnicos y usuarios y que incluyó la transferencia de conocimientos y tecnologías en el contexto del MUB, así como el desarrollo de nuevas capacidades para la construcción de plantas domésticas sencillas en el país.

Con respecto a los biodigestores familiares o de uso doméstico de la energía

A este impulso que tuvo lugar en los noventa contribuyeron experiencias prácticas desarrolladas por diferentes iniciativas, entre las cuales se incluyen los siguientes proyectos de autoconsumo:

1. Entre 1983 y 1993 el programa fue ejecutado por la extinta Comisión de Energía, bajo el cual se construyeron y desarrollaron varios biodigestores y proyectos en el país (Comisión Nacional de Energía 1993).
2. En el segundo quinquenio de la década de los ochenta el IIP, del MINAG, llevó a cabo sus primeros intentos con el biogás en el Departamento de Mecanización, una labor que se consolidó con la introducción directa de los resultados de la investigación en el Proyecto Internacional PNUD/FAO Cuba 91/011 sobre reciclaje y utilización de nutrientes a partir de los residuos para la producción de biogás y abonos orgánicos.
3. Entre 1991 y 1995, mediante el proyecto internacional Cuba-PNUD/FAO Cuba 091: "Reciclaje de residuos para su uso en la producción porcina", que contó con la colaboración de la Cooperación Técnica Alemana, se construyeron biodigestores de cúpula fija para su empleo en la producción porcina doméstica/de escala familiar.
4. A inicios del siglo XXI los departamentos de Mecanización y de Medio Ambiente ejecutaron dos proyectos internacionales financiados por la ONG Alternatives de Quebec, Canadá, por medio de los cuales se aprueba en 2009 la creación del CPDB, del IIP, que ha abordado los temas de desarrollo genético, alimentación y gestión de los residuos y estiércol porcícola hasta la actualidad.
5. Como parte de su trabajo en los programas de Protección al Medio Ambiente y de Emergencias Comunitarias, el Centro Cristiano de Reflexión y Diálogo ha desarrollado desde 1993 un trabajo sostenido en materia de plantas de biogás, fabricando más de 350 biodigestores y capacitando a muchas personas que los construyen, utilizan y promocionan en diferentes regiones y provincias del país.
6. Desde 2008 y hasta la actualidad, con el surgimiento de los proyectos Biomas-Cuba y Agroenergía, financiados por la COSUDE y OIKOS Portugal-UE, respectivamente, a través

de la EEPFIH se impulsa la construcción de biodigestores y la introducción de nuevas tecnologías para la utilización doméstica del biogás.

A partir de 2015, en el marco de la revolución energética, el MUB se ha consolidado, lo que ha fortalecido la actividad, mediante el rescate del patrimonio, la identificación de valores y capital humano, la creación de una cultura energética-ambiental, la socialización de las mejores experiencias y saberes y la integración y el desarrollo de capacidades. A inicios de esta tercera década es cuando se concibe la institucionalización y el desarrollo sostenible del biogás en el contexto del desarrollo local.

El MUB y el grupo de diseño del IIP, junto con las universidades cubanas, la EEPFIH y los diferentes proyectos de colaboración y con el apoyo de varios especialistas extranjeros, han implementado y desarrollado las más diversas tecnologías de biogás en el contexto local cubano (Guardado 2006, 2007). En la ilustración 20 se muestran algunas de ellas, además de varios prototipos de biodigestores.

Ilustración 20. Biodigestores de campana móvil y cúpula fija de diferentes tamaños

Biodigestores de campana móvil de 17, 11 y 3,5 m³ c/u, ubicados en los municipios de Los Palacios, Il Frente y Perico



Biodigestores de cúpula fija, de 12, 8 y 10 m³ c/u, ubicados en los municipios de Manicaragua, Candelaria y B. Masó



Notas: Biodigestores con más de tres años de operación y distribuidos en las tres regiones de Cuba (occidental, central y oriental).

Desde 2010 la construcción de biodigestores ha mostrado un incremento, con el MUB como principal promotor del establecimiento de plantas de biogás familiares y de pequeño porte, que hoy superan la cifra de 4500 unidades (cuyas innovaciones se han ido desarrollando a partir de los modelos más convencionales), sobre todo de biodigestores de cúpula fija y móvil, laberintos y biodigestores importados (tubulares y biobolsas), entre otros (ilustración 21). Las tecnologías con mayor aplicabilidad son fundamentalmente las de cúpula fija y de campana flotante (Guardado y Flores 2008). Estas plantas cumplen los principios de la biodigestión anaeróbica y se construyen con diferentes materiales y diversos diseños, en su mayoría con modificaciones, utilizando insumos y materiales locales en su construcción. Tienen

como objetivo fundamental tratar los residuos ganaderos (porcinos y vacunos) y su principal uso es el energético, debido a la fuerte crisis que está afrontando el país. Es sabido que, como portador energético, en estas pequeñas escalas el biogás no se emplea en la generación de electricidad, sino en la diversificación de las fuentes energéticas en el hogar, pues su uso directo resulta mucho más eficiente que su transformación en energía eléctrica, ya que en esta última gran parte del biogás se consume en la generación de calor residual, que no es aprovechado como en las escalas industriales.

Ilustración 21. Biodigestores de geomembranas tubulares de 12, 30 y 16 m³, ubicados en los municipios Camajuaní, Los Palacios y Perico



Se han encontrado diversos obstáculos para el establecimiento de biodigestores importados, como el escaso conocimiento y dominio de la tecnología por parte de los usuarios, la ausencia en el mercado nacional de estas tecnologías y sus accesorios, la escasa o nula posibilidad de importarlos debido a la falta de mecanismos para hacerlo y la imposibilidad de obtener financiamiento en USD.

El trabajo conjunto y las experiencias adquiridas permiten evaluar las tecnologías ya introducidas y mejorarlas, debido a lo cual se examinan nuevos materiales para la construcción de biodigestores tubulares y lagunas cubiertas con el propósito de garantizar una mayor durabilidad y resistencia.

En la actualidad se promueve el tratamiento de todos los residuos biodegradables en plantas de biogás pequeñas o grandes, familiares o industriales de manera consciente, organizada y responsable. Las leyes, los decretos y otras normativas que con el tiempo se han adoptado para proteger el medioambiente, usar de forma racional los recursos naturales y cumplir los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por el país favorecen esta política en curso, con la participación de las instituciones, la sociedad civil y el Gobierno.

En los últimos años se han introducido otros biodigestores, como las lagunas cubiertas (ilustración 22), con el objetivo de dar tratamiento a grandes volúmenes de residuos que no pueden ser tratados con biodigestores familiares. A continuación se ofrecen más detalles al respecto.

1.4.2 Escala productiva (para pequeñas empresas), tipos de biodigestores, diseños por ecorregiones, sustratos tratados, estado de operación, modelos de distribución, retos, financiamiento, etc.

En las últimas décadas la tecnología de producción de biogás por medio de la fermentación o biodigestión anaerobia ha sido ampliamente conocida y difundida en el país. Diversos sistemas

y tecnologías de plantas de biogás se han adaptado a las condiciones locales, de acuerdo con los recursos propios de cada una de las regiones del país, sin que estas tecnologías pierdan su esencia (Cepero *et al.* 2012). La capacidad o el tamaño del biodigestor depende de la cantidad de materia orgánica por tratar, sus características, temperatura y volumen (relación materia orgánica/agua) y su tiempo de retención en función de su posterior uso o vertimiento para evitar la contaminación ambiental. En este sentido, se debe considerar lo establecido en las respectivas normativas, así como la sabiduría científico-popular.

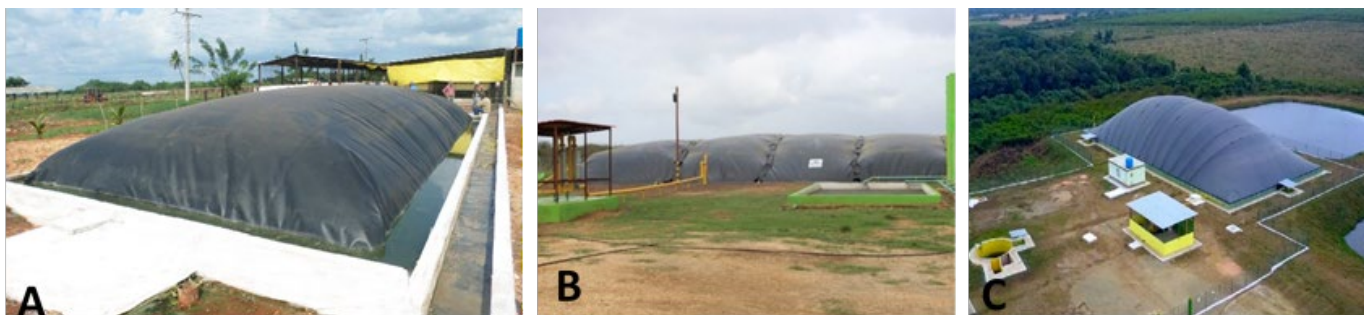
Entre los modelos familiares más difundidos se encuentran los biodigestores de cúpula fija y flotante (modelos chino e hindú) (ilustración 21), transformados de forma innovadora según los recursos locales disponibles; los tubulares plásticos o de manga de polietileno (modelo Taiwán) (ilustración 21); y los de flujo pistón, importados o producidos en el país con cloruro de polivinilo (PVC) y geotextil.

La colaboración entre las universidades del país, los vínculos con el MINAG, el Ministerio de la Industria Azucarera, centros de investigaciones, ONG y proyectos internacionales posibilitaron los primeros trabajos de procesamiento de residuos a escala industrial, junto con la Universidad Tecnológica de la Habana, que dirige este grupo de trabajo.

En los últimos años se han introducido otros biodigestores, entre ellos, las lagunas cubiertas (ilustración 22), con el objetivo de dar tratamiento a grandes volúmenes de residuos: laguna tapada con geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE o PEAD) (ilustración 22 A y B) de etileno propileno dieno tipo M (EPDM) (ilustración 22 C).

49

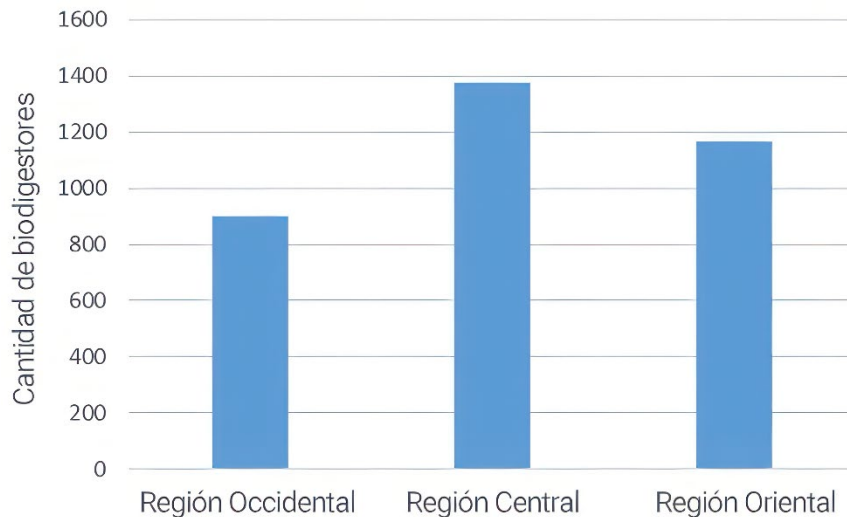
Ilustración 22. Lagunas cubiertas



Nota: A. biodigestor de 300 m³, finca Fortunita, municipio de Jovellanos, provincia de Matanzas; B. biodigestor de 1800 m³, Centro Porcino Frank País, municipio de Martí, provincia de Matanzas; C. biodigestor de 4200 m³, Centro Porcino Martí II, municipio de Martí, provincia de Matanzas.

Fuente: Tomado de Guardado y Flores 2008 y Cepero *et al.* 2012.

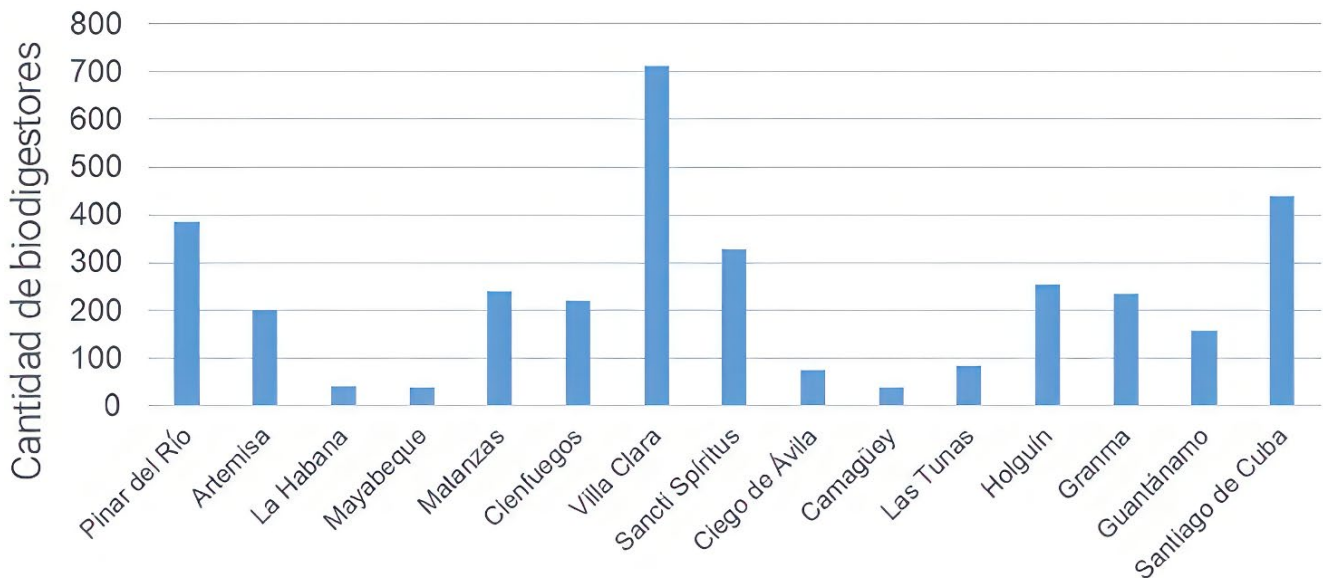
Según las estadísticas y los reportes de diferentes organizaciones e instituciones que abordan el tema del biogás, al finalizar 2019 se contaba en Cuba con un total de 3441 biodigestores; no obstante, se estima que en la actualidad son más de 4500. De los reportados en 2019, 1165 corresponden a la Región Occidental, 1374, a la Región Central y 902, a la Región Oriental (gráfico 3).

Gráfico 3. Cantidad de biodigestores por región en Cuba

Fuente: Cepero *et al.* 2012 y Guardado 2019.

En el gráfico 4 se muestra la distribución por provincias. La provincia de Villa Clara es la que presenta la mayor cantidad de biodigestores construidos hasta ese momento. Este incremento corresponde fundamentalmente a la introducción de una fábrica de biodigestores tubulares en esta región, debido a lo cual una mayor cantidad de productores porcinos emplean estos sistemas en el tratamiento de sus residuos. Se trata de productores que crían desde cuatro 29.

50

Gráfico 4. Cantidad de biodigestores implementados en Cuba por provincia

Fuente: Cepero *et al.* 2012

1.4.3 Referencias bibliográficas

Cepero, L; Savran, V; Blanco, D; Díaz Piñón, M; Suárez, J; Palacios, A. 2012. Producción de biogás y de bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *In* Suárez, J; Martín, GJ (eds.). La biomasa como fuente renovable de energía en el medio rural. Matanzas, Cuba, Estación Experimental Indio Hatuey. p. 131-142.

- Comisión Nacional de Energía. 1993. Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía. La Habana, Cuba, Premium Publicity.
- Guardado, JA. 2006. Tecnología del biogás: manual de usuarios. La Habana, Cuba, CUBASOLAR.
- Guardado, JA. 2007. Diseño, construcción y explotación de plantas de biogás sencillas. La Habana, Cuba, CUBASOLAR.
- Guardado, JA; Flores, JA. 2008. Manual del constructor de pequeñas plantas de biogás de cúpula fija. Maule, Chile. Gobierno de Chile, GEF, PNUD, CUBASOLAR.
- Guardado, JA *et al.* 2019. MUB: El movimiento de usuarios del biogás en Cuba. La Habana, Cuba. MUB.

1.5 Síntesis de las experiencias apoyadas por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Autor: Federico Vargas L.

En Paraguay existen experiencias puntales del uso de biodigestores a escala industrial y doméstica. En este apartado se presentan algunas que pudieron ser sistematizadas con base en la información disponible.

La Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA) ha impulsado el uso de esta tecnología en diferentes escalas mediante investigaciones y proyectos de extensión.

En la mayoría de los casos estas iniciativas son impulsadas por ONG, universidades o empresas, con el financiamiento de organizaciones internacionales. El apoyo estatal destinado al desarrollo de este tipo de tecnologías es mínimo.

Uno de los proyectos realizados en 2012 consistió en impulsar el uso de biodigestores en el tratamiento de la materia orgánica generada por 20 fincas rurales en la ciudad de Piribebuy. Se instaló un biodigestor demostrativo tubular de bajo costo de 8 m³, hecho con polietileno, en las 20 fincas. Este proyecto, financiado por el Programa de Pequeñas Donaciones del PNUD, tenía como objetivo impulsar el desarrollo sostenible de las fincas rurales por medio de un sistema productivo agropecuario centrado en el uso de biodigestores (ilustración23).

Ilustración 23. Biodigestor tubular instalado en el Centro de Capacitación y Tecnología Apropriada de la FCA-UNA



A partir de 2014 este proyecto se amplió con fondos de la UE para incorporar el cultivo de plantas medicinales y aromáticas en las fincas, así como la utilización del biogás en la deshidratación de los alimentos, para lo cual se diseñó un deshidratador solar que funciona con biogás (Moreno *et al.* 2013, Martí *et al.* 2016, Vargas y Moreno 2020).

Estas dos experiencias han permitido el desarrollo de diferentes investigaciones dirigidas a determinar el poder calórico del biogás, el nivel de apropiación de los biodigestores, el potencial de uso del biol en el cultivo de especies medicinales y aromáticas, la composición del biol y el impacto de los biodigestores en la sostenibilidad de las fincas rurales, entre otros (Soverina y Vargas 2013, Vargas 2016, Vargas y Giménez 2017, Vargas y Moreno 2014, 2017).

Actualmente la FCA está desarrollando un proyecto de investigación para determinar el potencial de un biodigestor tipo hindú en el tratamiento de la FORSU en la ciudad de Piribebuy, para lo cual se ha fortalecido el biodigestor tipo hindú de la FCA, por medio de la instalación de sensores que permiten el monitoreo constante de la temperatura y el pH. Además, la FCA cuenta con un laboratorio de tecnología ambiental donde se realizan investigaciones dirigidas a determinar el potencial de producción de biogás de diferentes sustratos.

Paralelamente al desarrollo de estas actividades, la FCA brindó respaldo a la ONG Tierra Nueva en la implementación de un proyecto con financiamiento de la Fundación Interamericana, cuyo fin era fortalecer la producción hortícola en 20 fincas rurales de Piribebuy a través de la implementación de prácticas agroecológicas y biodigestores; para ello se instaló un sistema integrado de producción con un reactor anaeróbico de 1 m³ para la producción de biol, que se utiliza en la fertilización de huertas familiares (Vargas y Moreno 2018).

1.5.1 Referencias bibliográficas

- Martí Herrero, J; Pino, M; Gallo Mendoza, L; Pedraza, GX; Rodríguez, L; Víquez, J. 2016. Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de biodigestores de pequeña y mediana escala en LAC (en línea). RedBIOLAC. 51 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://energypedia.info/images/4/49/Oportunidades-desarrollo-sector_seg%C3%BAAn-RedBioLAC.pdf.
- Moreno, C; Gavilán, M; Duarte, A. 2013. Diseño de deshidratador mixto para el secado de especies medicinales y aromáticas. Congreso Nacional de Ecología Humana (1, 2013, San Lorenzo, Paraguay). San Lorenzo, Paraguay.
- Soverina, R; Vargas, F. 2013. Adopción de biodigestores en la compañía Paso Jhu, distrito de Piribebuy, Cordillera (en línea). San Lorenzo, Paraguay, UNA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://es.slideshare.net/fvargaslehner/adopcin-de-biodigestores-en-la-compaa-paso-jhu>.
- Vargas, F. 2016. Potencial de biodigestores para el tratamiento de efluentes orgánicos en el ámbito rural. Revista de la Sociedad Científica del Paraguay 21(1):111-124.
- Vargas, F; Giménez, A. 2017. Los biodigestores como componentes claves para la sostenibilidad de la agricultura familiar. Revista RedBioLAC 2:27-31.

- Vargas, F; Moreno, C. 2014. El biodigestor como alternativa para una agricultura sostenible: primeras experiencias en Paraguay. Congreso Latinoamericano de la Red de Biodigestores de América Latina y el Caribe (VI, 2014, Cali, Colombia). Cali, Colombia.
- Vargas, F; Moreno, C. 2017. Ventajas e inconvenientes de la utilización de biodigestores tubulares en la agricultura familiar: el caso de la compañía Paso Jhú. San Lorenzo, Paraguay.
- Vargas, F; Moreno, C. 2018. El sistema productivo implementado. *In* Giménez, A. Kuña Tembiapo: el trabajo de la mujer en sistemas agrícolas familiares, el caso del proyecto "Producción Hortícola Sostenible". Tierra Nueva. p. 5-15.
- Vargas, F; Moreno, C. 2020. El deshidratador biotérmico. *Revista RedBioLAC* 4:19-22.

1.6 Unidades productoras de biogás en Brasil: escenario general y del sector del saneamiento y la FORSU en particular

Autores: Viviana Solano Ramírez y Tiago Borges Ferreira

1.6.1 Introducción

Desde la segunda mitad del siglo XIX la DA se ha empleado en la depuración de aguas residuales y a partir de 1960 su uso se amplió a la digestión de residuos sólidos urbanos y agropecuarios (McCarty 1981, Mata-Álvarez 2003). Actualmente su utilización está condicionada por distintos aspectos, siendo las condiciones climáticas uno de los principales. Gran parte de los países de Latinoamérica y el Caribe tienen temperaturas favorables para los procesos de DA, incluso con tecnología en condiciones simplificadas, lo que puede contribuir a la viabilidad económica de unidades descentralizadas. Brasil es uno de los países que se beneficia de sus condiciones climáticas y utiliza procesos anaerobios en la valorización o el tratamiento de distintos compuestos, principalmente en el sector de tratamiento de aguas residuales municipales. Este apartado tiene el objetivo de presentar el escenario general y del sector de saneamiento brasileño relativo a las unidades de tratamiento anaerobio con aprovechamiento del biogás.

1.6.2 Visión general del escenario brasileño

En la ilustración 24 se presenta de forma objetiva la principal información sobre la producción de biogás en Brasil. Según CIBiogas (2020), existen 675 unidades de producción de biogás distribuidas en el territorio brasileño, concentradas principalmente en las regiones sur y sureste del país. En 2020 se produjeron 2222 millones de m³ de biogás, que equivalen a 8 035 617 MWh. Esta energía se empleó sobre todo como energía eléctrica (el 86.8 % de la energía producida en el 87 % de las plantas de producción de biogás), energía térmica (9.8 %), biometano (2.8 %) y energía mecánica (0.6 %).

En el país la mayoría de las plantas de producción de biogás utilizan residuos agropecuarios (78 % de las unidades) como fuente de sustrato, residuos de actividades industriales (13 %), residuos sólidos urbanos (7 %) y residuos generados en el tratamiento de aguas residuales (2 %); sin embargo, es a partir de los residuos sólidos urbanos que se produce la mayor parte del biogás (72 %), cuando se considera la captura desde rellenos sanitarios, que no son

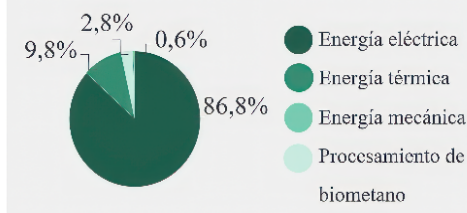
precisamente reactores anaeróbicos con las condiciones adecuadas y controladas requeridas para la digestión anaeróbica (ilustración 24).

Ilustración 24. Ubicación de las plantas de producción de biogás en Brasil

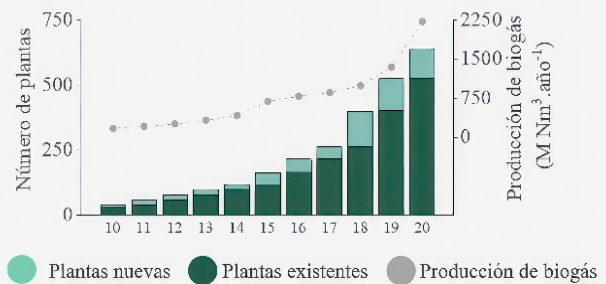
Ubicación de plantas de producción de biogás (Fig. 1a)



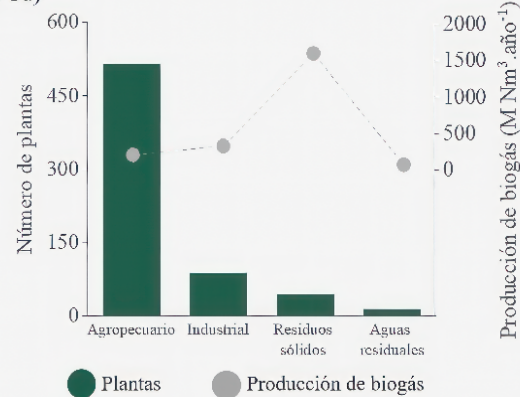
→ 675 plantas de producción de biogás
→ 2.222 M Nm³.año⁻¹ de biogás producidos
→ 8.035.617 M WH/año producidos (Fig. 1b)



Evolución anual de número de plantas y producción de biogás (Fig. 1c)



Plantas y producción de biogás en el año 2020, por sector (Fig. 1d)



Notas: Los datos indicados en la ilustración pueden encontrarse en CIBiogás (2020) y MDR (2020).

En el escenario de producción de biogás en Brasil cabe resaltar el aumento en la instalación de plantas de generación y en la producción de biogás en los últimos años (figuras 1b, 1c y 1d). Según la plataforma Biogasmapp (2022), entre 2010 y 2015 el incremento en el número de plantas de producción de biogás fue de 394 % (de 33 a 163 plantas), mientras que entre 2015 y 2020 este fue de 445 % (de 117 a 638 plantas). Con respecto al biogás producido, solamente entre 2018 y 2020 la producción se incrementó en 85 %, llegando al volumen anual de 2222 millones de m³ de biogás (CIBiogás 2020).

1.6.3 La DA en el sector del saneamiento

1.6.3.1 DA en el tratamiento de aguas residuales municipales

En Brasil los reactores anaerobios están presentes en el 37 % del total de PTAR municipales (3668 plantas) (ANA 2020); no obstante, el uso del biogás producido por estos reactores todavía no es muy efectivo. De acuerdo con la información de la plataforma Biogasmapp (2022) y los datos del Diagnóstico de 2019 del Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento (SNIS) (MDR 2020), solo ocho de las más de 1300 plantas con reactores anaerobios realizaban un aprovechamiento energético del biogás.

Asimismo, de las unidades con lodos activados con DA del lodo aerobio excedente, únicamente siete de las más de 250 unidades en funcionamiento aprovechaban el biogás generado (ilustración 25). La totalidad del biogás producido en estas unidades representa alrededor del 5 % de todo el biogás generado en el sector de saneamiento, pues la gran mayoría del biogás producido en Brasil proviene de la captura del metano generado espontáneamente en los rellenos sanitarios.

En la ilustración 25 se observa la ubicación de las unidades de producción de biogás del sector de saneamiento. La DA de la FORSU se detallará en la **sección 1.6.4**.

La mayor parte del biogás producido actualmente en las PTAR brasileñas se destina a los quemadores de seguridad (antorchas), sin aprovechamiento energético. En el país el uso del biogás generado en las PTAR es un tema de investigación desde la década de los ochenta (Miki 2018); sin embargo, como se puede verificar en la figura 1, el aumento en el número de plantas de generación y aprovechamiento del biogás es reciente en el país.

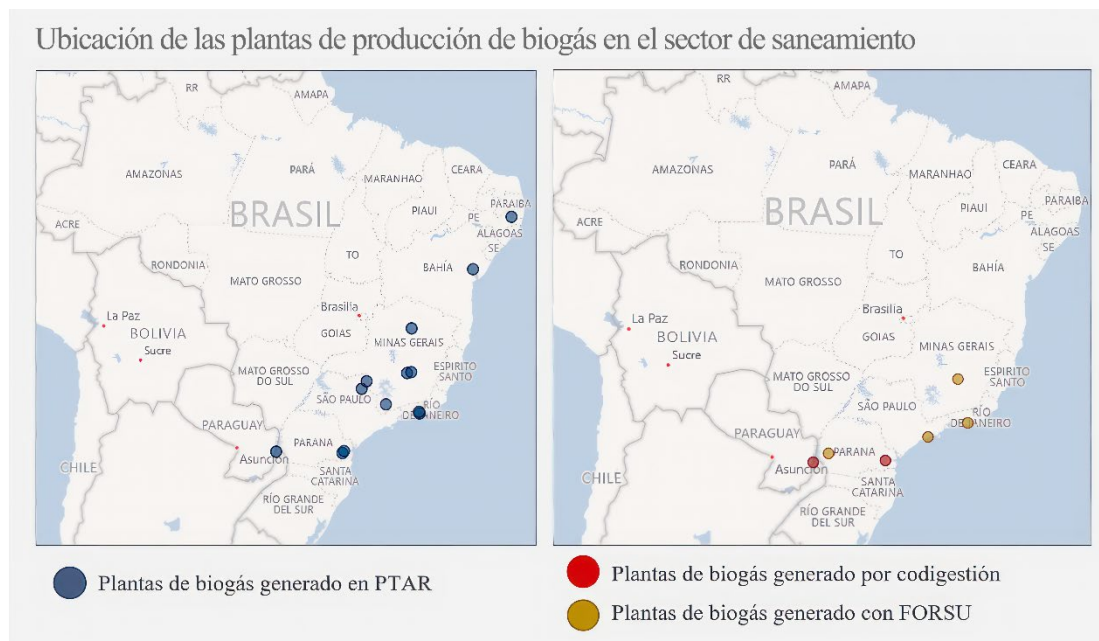
Su aprovechamiento energético, específicamente del biogás producido por reactores anaerobios como los de UASB, está condicionado a la gestión de las emisiones fugitivas, que pueden representar más del 50 % de la producción total, así como a la eficiencia de los sistemas de tratamiento del gas, que garantiza la ausencia o las bajas concentraciones de compuestos indeseables (Santos *et al.* 2021). Los principales compuestos indeseables e impurezas presentes en el biogás producido a partir de las aguas residuales municipales son el H₂S, el vapor de agua, los siloxanos, el CO₂ y el N₂ (Deublein y Steinhäuser 2011).

A fin de contribuir al tratamiento de las aguas residuales municipales y al aprovechamiento del biogás, así como de otros subproductos, surgió el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en PTAR Sostenibles, una red de universidades y centros de investigación brasileños enfocada en estos temas. Recientemente, en colaboración con la Asociación Brasileña de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, este realizó la publicación de dos ediciones de la revista Cuadernos Técnicos de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en torno a los avances en la gestión y el tratamiento del biogás, además del control de emisiones de gases en las PTAR con procesos anaerobios. Estas publicaciones pueden ser consultadas en la página web de la revista¹².

Los subproductos sólidos del tratamiento de las aguas residuales municipales suelen ser destinados a rellenos sanitarios; no obstante, en la actualidad existe un mayor incentivo para el uso con fines agrícolas de la fracción de los tratamientos primarios y secundarios, denominados lodos. La legislación brasileña con respecto al empleo del lodo y el biosólido: la Resolución CONAMA 498/2020, ha sido perfeccionada recientemente para viabilizar su mayor utilización.

¹² https://abes-dn.org.br/?page_id=43257.

Ilustración 25. Ubicación de las plantas de producción de biogás en el sector de saneamiento de Brasil



Fuente: Adaptado de CIBiogás 2020 y Santos *et al.* 2021.

1.6.4 DA de la FORSU

Además de las aguas residuales municipales, los residuos sólidos urbanos integran el sector de saneamiento, por lo que requieren una adecuada gestión. La valorización y el tratamiento de la FORSU también pueden verse beneficiadas por la DA.

Hoy, a pesar de que la producción de biogás en Brasil proviene en su mayor parte de la FORSU encontrada en rellenos sanitarios, la aplicación de la DA para su valorización (a partir de la segregación en origen y la recolección diferenciada) es relativamente reciente en algunas plantas instaladas desde 2011 (MDR 2018). Utilizando tecnología extraseca, dos plantas en gran escala operan en la región sureste del país (ilustración 24), con capacidades de valorización desde 4 hasta 50 ton.d⁻¹ de FORSU (MDR 2018, Ornelas-Ferreira *et al.* 2020).

Por otro lado, los residuos orgánicos con un elevado nivel de segregación, como los residuos de alimentos derivados de su preparación para el consumo humano, suelen ser valorizados en procesos húmedos, caracterizados por una concentración de sólidos totales (ST) inferior a 10 g.L⁻¹ (Braguglia *et al.* 2018, Kumar y Samadder 2020). Esta modalidad puede ser considerada más flexible, ya que se puede aplicar en distintas escalas y niveles tecnológicos, incluso en codigestión con el subproducto sólido de las PTAR y del agua residual municipal.

Dos plantas instaladas en la región Sur de Brasil son un claro ejemplo de estas posibilidades (ilustración 25). La primera es una unidad con capacidad de valorización de hasta 900 m³.d⁻¹ de lodo aerobio, proveniente del tratamiento de aguas residuales municipales, y 300 ton.d⁻¹ de residuos de alimentos (MDR 2018). La segunda unidad valoriza 0.6 ton.d⁻¹ y 1.2 ton.d⁻¹ de residuos de alimentos y césped, respectivamente, además de 10 m³.d⁻¹ de aguas residuales municipales (Galvão *et al.* 2017).

Con escalas menores y una digestión única de los residuos de alimentos, ya existen algunas plantas destinadas al tratamiento descentralizado de estos desechos: una de ellas se destinará a la valorización de los residuos de alimentos generados en un campus universitario (Ferreira *et al.* 2020, Martins *et al.* 2017) y la otra, en un restaurante popular (Kuczman *et al.* 2018). Según el Plan Nacional de Saneamiento Básico, la valorización descentralizada de los residuos de alimentos, sea por compostaje o por DA, es la alternativa que trae más beneficios a la gestión de los residuos orgánicos en Brasil (MDR 2018).

1.6.5 Consideraciones finales

A pesar del actual número total de plantas y de su incremento reciente, aún hay un gran potencial por ser explotado. El sector del saneamiento constituye un ejemplo de este potencial que se está concretizando. La valorización de la materia orgánica mediante la DA, junto con el aprovechamiento de sus subproductos: el biogás y los nutrientes, se puede efectuar en varias formas, con posibilidades de aplicación en distintas realidades y escalas y con diferentes capacidades de inversión.

Con respecto a las posibilidades observadas de aprovechamiento del biogás, este se puede transformar en energía térmica, mecánica o eléctrica, para el autoabastecimiento de la planta o para la comunidad. Una de las posibles aplicaciones del biogás es en la higienización del lodo producido, lo que puede viabilizar el aprovechamiento seguro de los nutrientes en la agricultura.

Por otro lado, las unidades de gran escala son más viables en términos del aprovechamiento de sus subproductos, p. ej., con la posibilidad de generar energía eléctrica o biometano a partir del biogás. Por lo tanto, además de reducir el potencial de contaminación de las aguas residuales municipales y residuos orgánicos, la DA permite la concepción de estas unidades desde una perspectiva circular, que puede contribuir a lograr una sociedad más sostenible.

1.6.6 Referencias bibliográficas

- ANA (Agencia Nacional de Aguas, Brasil). 2020. Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil. Brasília. 44 p.
- Braguglia, CM; Gallipoli, A; Gianico, A; Pagliaccia, P. 2018. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: a critical review (en línea). *Bioresource Technology (A)* 248:37–56. Consultado 3 de noviembre de 2022.. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.145>.
- CIBiogás (Centro Internacional de Energías Renovables-Biogás, Brasil). 2020. Panorama do biogás no Brasil em 2019 (en línea). Paraná, Brasil. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://biblioteca.cibiogas.org/biblioteca/notatecnica/pdf/panorama-do-biogas-no-brasil-em-2019.pdf>.
- Deublein, D; Steinhäuser, A. 2011. *Biogas from waste and renewable resources*. 2 ed. Weinheim, Alemania, Wiley-VCH.
- Ferreira, TB; Torres-Franco, AF; Ferreira, LO; Mota, CR; Souza, CL; Passos, F. 2020. Digestión anaerobia acoplada a la producción de biomasa microalgal para el tratamiento integrado de residuos de alimentos. *Revista RedBioLAC* 4:83-88.

- Galvão; RR de A; Gomes, RCA; González, RH de A; Marques, FS; Schmoeller, L; Sousa, MA; Zank, JCC. 2017. Biomethane demonstration: innovation in urban waste treatment and in biomethane vehicle fuel production in Brazil (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/Biogas-Demonstration-Brazil-2.pdf>.
- Kuczman, O; Gueri, MVD; De Souza, SNM; Schirmer, WN; Alves, HJ; Secco, D; Buratto, WG; Ribeiro, CB; Hernandez, FB. 2018. Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production* 196:382-389.
- Kumar, A; Samadder, SR. 2020. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: a review. *Energy* 197.
- Martins, A da S; Ornelas Ferreira, B; Ribeiro, NC; Martins, R; Rabelo Leite, L; Oliveira, G; Colturato, LF; Chernicharo, CA; de Araujo, JC. 2017. Metagenomic analysis and performance of a mesophilic anaerobic reactor treating food waste at various load rates (en línea). *Environmental Technology* 38(17):2153-2163. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2016.1247197>.
- Mata-Álvarez, J (ed.). 2003. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Londres, Inglaterra, IWA.
- McCarty, PL. 1981. One hundred years of anaerobic treatment. Ámsterdam, Países Bajos, Elsevier Biomedical.
- MDR (Ministerio de Desarrollo Regional, Brasil). 2018. 4 caderno temático: valorização de resíduos orgânicos (en línea). Brasilia. 43 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.gov.br/mdr/pt-br>.
- MDR (Ministerio de Desarrollo Regional, Brasil). 2020. 25.º Diagnóstico dos serviços de água e esgoto 2019 (en línea). Brasilia. 183 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagnóstico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf.
- Miki, RE. 2018. Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso como biocombustível veicular. *Revista DAE* 209(66):6-15.
- Ornelas-Ferreira, B; Lobato, LCS; Colturato, LFD; Torres, EO; Pombo, LM; Pujatti, FJP; Araújo, JC; Chernicharo, CAL. 2020. Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro - Brazil (en línea). *Renew Energy* 146:1976-1983. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.049>.
- Santos, JMB; Souza, CL; Brandt, EMF; Possetti, GRC; Chernicharo, CAL. 2021. Parte A: avanço nas ferramentas e técnicas para estimativa de produção e tratamento de biogás em ETEs com reatores anaeróbios: tópicos de interesse. *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental* 1(1):5-19.

CAPÍTULO

2

CAPÍTULO 2

POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS EN ALC EN PAÍSES SELECCIONADOS¹³

De acuerdo con los trabajos incluidos en este capítulo, el potencial de generación de biogás es determinado principalmente por la posibilidad de dar valor a los residuos orgánicos disponibles en grandes volúmenes como una vía de gestión de flujos de la materia orgánica derivada de diferentes procesos productivos. Muchos de los residuos disponibles no son declarados ni apropiadamente gestionados; sin embargo, los registros de exportación de algunos productos (p. ej., procesados de salmón u otros productos de la agroindustria) dan una idea del potencial de generación de la región. La fiscalización estricta, las multas asociadas y los incentivos pueden ser métodos para estimular la implementación de soluciones dirigidas a abordar la crisis climática actual y futura.

Parece innecesaria la formulación de políticas de producción de materias primas para la DA, pues en América Latina los flujos de residuos orgánicos son altos, descentralizados y están disponibles todo el año. Por otra parte, estas mismas industrias hoy dependen de fertilizantes sintéticos producidos con un alto consumo de combustibles fósiles. El aprovechamiento del digestato en los suelos agrícolas para la alimentación animal o humana resulta una gran oportunidad económica y ambiental que contribuye al reciclado de nutrientes y a importantes ahorros de emisión de GEI. Dicho aprovechamiento ha sido por el momento poco desarrollado en América Latina y en muchos proyectos genera incertidumbre. Dado que se suele pensar en la DA solo en relación con el biogás, es fundamental impulsar la producción y el uso del digerido en los proyectos. La promoción del uso responsable de los digestatos en la agricultura podría tener un fuerte impacto positivo en el espacio socioecológico circundante y en la flora y la fauna locales.

La DA estabiliza la materia orgánica y disminuye su capacidad de contaminación, produciendo dos subproductos de alto valor: el biogás y el bioabono (digerido, digestado, también llamado biol o efluente). Es por esto que la DA es altamente valorada, ya que realiza un importante aporte a los modelos de negocios en casi todos los sectores relacionados con el agro, que a su vez resultan comunes a gran parte de los países latinoamericanos. Desde la ganadería y la agroindustria (incluidos los mataderos y frigoríficos), pasando por la fruticultura, la lechería y la producción cervecera o de café, hasta la salmonicultura, la producción de biogás permitiría el autoabastecimiento (total o parcial) de energía con fines térmicos, mecánicos, eléctricos, de refrigeración y de calefacción, así como la venta del excedente en forma de energía eléctrica. Hacer una revisión y un análisis subregional de las experiencias exitosas o de las que aún tienen

¹³ Autores: Aneley Routier, Florencia Rivarosa, Tiago Borges, Claudio Leite, José María Rincón Martínez, Andrea Jéssica Agresott, Joaquín Viquez, Miriam Cleide, Paula Tereza de Souza e Silva, Alfredo Erlwein, Eliana Sotomayor, Adriano Henrique Ferrarez, Mercedes Echarte, Nadia Gabbanelli, Carol Elvir, Osmer Ponce, Luis Cepero Casas y José A. Guardado

problemas de funcionamiento resulta muy recomendable, sobre todo en países de grandes extensiones y con diversos tipos y volúmenes de sustratos.

En el marco de una buena planificación la sostenibilidad de los proyectos descentralizados debe incorporar el concepto de estacionalidad de los flujos para lograr la codigestión de sustratos y cuidar la inercia biológica de la DA. La codigestión permite también la asociatividad en escenarios descentralizados de zonas agrícolas o cordones periurbanos, lo que posibilita hacer diseños interesantes e innovadores.

Son pocos los países que cuentan con marcos regulatorios específicos para la DA. En algunas naciones la falta de una legislación adecuada que sirva de base para el diseño y el dimensionamiento de un proyecto y que permita la obtención de presupuestos individuales según cada necesidad y caso genera incertidumbre entre quienes desarrollan proyectos. Se deben considerar las necesidades reales de cada país y adaptar los requerimientos técnicos de seguridad según el tamaño del reactor, sin extrapolar o generalizar la reglamentación en diferentes instalaciones y contextos. Esto ayudará a desarrollar normativas que garanticen la seguridad de la operación de estas plantas, a fin de incentivar la inversión o facilitar las iniciativas de escala pequeña o mediana.

Para darle un impulso a la DA es fundamental contar con herramientas de promoción de la tecnología a largo plazo (financiamiento, infraestructura, capacidades técnicas, etc.). En algunos países existen incentivos tales como el financiamiento de bancos estatales para una agricultura baja en carbono, que ha aumentado de manera significativa el número de plantas de biogás que procesan residuos de alto potencial metanogénico (como en las industrias porcícola y azucarera). En Brasil, en particular, durante un largo tiempo el fomento de distintas formas de producción de energía renovable ha permitido promover la instalación de plantas de diferente escala y asegurar su sostenibilidad en el tiempo, para lo cual es necesario convocar a todos los actores involucrados y definir un escenario político que no cambie las reglas del juego con cada nuevo gobierno. A fin de lograr que una comunidad adopte la DA como una forma de gestión de residuos que genera energía renovable asequible y cierra el ciclo de nutrientes es indispensable la colaboración y el diálogo en el ámbito de la investigación, así como la participación de la comunidad de usuarios, para contribuir a la generación de conocimientos y garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

En algunos países las grandes distancias geográficas pueden constituir un desafío para la construcción y operación de plantas de biogás; no obstante, los municipios pueden considerarlo como una forma descentralizada de generación de ingresos. Las energías renovables no convencionales en general han tenido un alto grado de desarrollo en períodos de crisis energética, mientras que, en contextos de crisis económicas, se interrumpen las inversiones, aunque se conozca su potencial y necesidad de instalación. La soberanía energética será cada vez más importante, por lo que recomendamos prestar atención a los nuevos modos de producción y aprovechamiento del biogás.

En algunos países ni la FORSU ni las aguas negras se tratan por medio de la DA; sin embargo, el evidente colapso de los rellenos sanitarios (RRSS) y la presión social en torno a los basurales, vertederos y los mismos RRSS ha despertado el interés por esta práctica. Para su adopción se

requiere una inversión en capacitación social y fraccionamiento de la cadena aguas arriba, que incluya la segregación en el origen y la recolección diferenciada. En función de la pureza de los flujos de la FORSU será posible definir si el reactor podrá trabajar en el rango de biomasa húmeda o seca. La calidad de la FORSU determinará el diseño, la complejidad técnica, las demandas de operación y los costos de inversión y operación, además de la viabilidad del uso del digestato como fertilizante inocuo para los suelos. La DA se puede incorporar a la gestión sana de residuos y combinarse con otros procesos de valorización como el compostaje y el acopio, el reciclaje y el aprovechamiento de residuos inorgánicos, buscando mejorar una gestión en la que cada día se enfrentan mayores desafíos. Siempre será mejor evitar la fabricación de envases, embalajes y otros residuos, sobre todo los de un solo uso.

En el plano municipal se recomienda el desarrollo y la promoción de biodigestores de pequeña escala que no alteren el paisaje urbano, pero que permitan la descentralización del tratamiento de residuos, eliminando así el desplazamiento a RRSS desde el centro de las ciudades hacia zonas rurales, una práctica muy arraigada en la región que conlleva importantes gastos para los municipios, entre otros muchos aspectos negativos.

Con respecto a cómo alcanzar el potencial para la implementación de biodigestores domésticos, se ha demostrado que la educación, la difusión y la exposición de experiencias exitosas son las herramientas necesarias para ayudar a aumentar la adopción del biogás en zonas rurales y de pequeña escala. Asimismo, a través de la construcción de digestores piloto en comunidades rurales se expondrá a sus miembros las ventajas prácticas de esta tecnología, permitiéndoles participar en la gestión de estos sistemas y, simultáneamente, disfrutar de sus beneficios.

Es importante que los responsables de la formulación de políticas tengan en cuenta que la educación es la fuerza impulsora que clarifica y establece metodologías adecuadas para la adopción de una tecnología. Por lo tanto, es necesario que los gobiernos y sus ministerios proporcionen plataformas para el aprendizaje y la demostración de la tecnología del biogás en todas sus escalas y que, además, involucre en el aprendizaje a su personal técnico y a los tomadores de decisiones. Una propuesta es, p. ej., diseñar la producción y el acceso al biogás como un servicio público para las comunidades, enmarcado en el desarrollo sostenible y en sus tres dimensiones (social, económica y ambiental). Esto permite ampliar el abanico de posibilidades de gestión de residuos y evitar la importación de combustibles fósiles y contribuye a cumplir con los compromisos internacionales adquiridos y los planes de desarrollo nacionales y regionales (NAMA, carbono neutralidad, estrategias, compromisos vinculantes, etc.).

El desarrollo de la DA como una de las estrategias de desarrollo sostenible del país crea una demanda de personal calificado en el diseño y cálculo de los biodigestores, la construcción de los equipos y el manejo operativo de las plantas. También genera trabajo no solo en el campo, sino también en la recolección y el transporte de desechos agropecuarios, el mantenimiento de las plantas y las redes de distribución.

2.1 Tecnologías y casos testigos de DA aplicada a la FORSU en la provincia de Santa Fe, Argentina

Autoras: Aneley Routier y Florencia Rivarosa

En los últimos años en Argentina se ha reportado un crecimiento constante en el uso del biogás, reflejado en el *Relevamiento nacional de biodigestores: relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico* (FAO 2019). Se analizó la existencia de 105 plantas de biogás distribuidas en 16 provincias, de las cuales Santa Fe es la que presenta un mayor desarrollo en la generación y el aprovechamiento de dicho recurso. Esto se debe principalmente a las condiciones favorables de la zona en cuanto a la disponibilidad de materia prima, así como el grado de formación técnica de los recursos humanos, las oportunidades de capacitación que se brindan en el territorio desde 2017 (MACC s. f., FAO et al. 2018) y el fomento a la generación de energías renovables por parte del Estado nacional y provincial (MEM 2021).

En relación con los sustratos empleados en las plantas, en primer lugar se encuentran los efluentes industriales y, en segundo, los residuos urbanos. En esta última categoría se incluyen los efluentes, los barros cloacales y la fracción biodegradable de RSU (FAO 2019). Si bien la fracción orgánica de los RSU (FORSU) constituye un sustrato con elevado potencial para la producción de biogás (Pramanik et al. 2019), a la fecha son escasas las experiencias operativas que utilizan la DA en el tratamiento de estos residuos, entre ellas, las plantas ubicadas en las provincias de Entre Ríos (Cerrito) y San Luis (Carpintería) (FAO 2019). Además de estos biodigestores se destacan cuatro proyectos en distintas regiones del país que se pondrán en marcha mediante el financiamiento otorgado por el PNUD (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

Específicamente en la provincia de Santa Fe, situada en la Región Centro de Argentina, existen dos plantas de digestión anaeróbica con similares características técnicas, las cuales son alimentadas con la fracción orgánica de los RSU. Estas evidencian la factibilidad de la tecnología para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables, su importancia en la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GIRSU) y el aprovechamiento energético a partir del biogás. Por otro lado, en la ciudad de Rafaela, desde 2019 se trabaja en el diseño y la implementación de una planta de digestión anaeróbica seca para el tratamiento de mayores volúmenes de residuos biodegradables.

En este documento se lleva a cabo el análisis de las plantas ubicadas en la provincia de Santa Fe, en las localidades de Ataliva, Emilia y Rafaela. La información generada y analizada forma parte de líneas de investigación sobre el biogás que se llevan a cabo en la Universidad Nacional de Rafaela. Se pone especial énfasis en las tecnologías empleadas, los actores involucrados, el rol de los biodigestores en la gestión de los residuos, el aprovechamiento del biogás y las perspectivas y aprendizajes de estos casos testigos. Asimismo, se comparan las digestiones secas y húmedas como alternativas para el tratamiento de la fracción biodegradable de los RSU, a partir del monitoreo de plantas en funcionamiento, así como el estudio y desarrollo de una planta piloto en la ciudad de Rafaela.

2.1.1 Descripción de los casos

La localidad de Ataliva se encuentra ubicada en el centro de la provincia de Santa Fe, en plena llanura pampeana, a unos 107 km de la capital provincial. En el último censo nacional (INDEC 2010) se contabilizaron 2065 habitantes; no obstante, la localidad recibe un constante flujo de estudiantes provenientes de localidades limítrofes, debido principalmente al establecimiento de la Escuela de Educación Técnico-Profesional Particular Incorporada N.º 2010 IDESA, lo que incrementa paulatinamente el total de la población. Desde 2019 en Ataliva se encuentra en operación una planta de biogás que trata los residuos biodegradables de la población y de un supermercado (ilustración 26), así como el estiércol de vaca proveniente del tambo de la escuela agrotécnica. La planta se localiza en el terreno de esta institución y es operada por la administración de la localidad.

La localidad de Emilia, situada 70 km al norte de la capital santafesina, tiene 1015 habitantes (INDEC 2010) y presenta la misma particularidad que Ataliva: durante el período lectivo recibe una gran cantidad de estudiantes de la zona que asisten a la Escuela Agrotécnica Particular Incorporada N.º 2050 Monseñor Vicente Faustino Zazpe. **Desde hace más de veinte años la comuna¹⁴ de Emilia realiza la separación de sus residuos**, cuya gestión incluye: la recolección diferenciada, el acopio y la venta de materiales reciclables, la valorización de la fracción orgánica, una planta de biogás y la disposición final en función de la naturaleza de los residuos. En 1992 se efectuó la instalación de la planta de biogás, la primera de su tipo en el país (ilustración 26). Su diseño se basó en la simplicidad de su operación, característica que permite que se produzca biogás con una mínima intervención humana y tecnológica.

Ilustración 26. Plantas de digestión húmeda de la fracción biodegradable de los RSU de las localidades de Ataliva (izquierda) y Emilia (derecha), Santa Fe, Argentina



Nota: Ambos biodigestores se encuentran enterrados a más de dos metros de profundidad para garantizar el aislamiento térmico.

¹⁴ Comuna: centro de población que no alcanza los 10 000 habitantes, pero que posee como mínimo 500.

Por último, la localidad de Rafaela, ubicada 100 km al noroeste de la ciudad de Santa Fe y con 110 000 habitantes, es una ciudad productiva y manufacturera que se destaca en el ámbito nacional por su política en materia de GRSU. Desde hace más de 15 años ejecuta el programa “Rafaela + Sustentable” y fundó un instituto autárquico para la gestión y disposición de los residuos domiciliarios y urbanos clasificados en fracción seca (materiales reciclables) y fracción húmeda u orgánica.

Esta característica propia de la ciudad representa un punto de partida para el diseño de estrategias de valorización de residuos y generación de biogás, como la digestión anaeróbica seca (ilustración 27). Específicamente, durante 2019 y 2020, a partir de una vinculación público-privada, se desarrolló la ingeniería básica de una planta de digestión anaeróbica seca para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU (Routier *et al.* 2020).

Las características técnicas y de diseño de cada una de las plantas mencionadas se detallan en la tabla 3.

Ilustración 27. Planta de digestión seca ubicada en Rafaela, Santa Fe, Argentina



Nota: La automatización y la seguridad de la operación son la base del diseño de la planta de digestión seca de la fracción orgánica de la ciudad.

Tabla 3. Comparación de las variables de diseño, equipamiento y operación de las plantas de DA de la fracción biodegradable de los RSU ubicadas en la provincia de Santa Fe, Argentina

	Planta de Ataliva (en operación)	Planta de Emilia (en operación)	Planta de Rafaela (diseño en ejecución)
Diseño y equipamiento			
Tecnología de digestión	Flujo en pistón con agitación mecánica y recirculación, digestión húmeda (ST < 15 %)	Flujo en pistón con agitación mecánica y recirculación, digestión húmeda (ST < 15 %)	Digestor tipo <i>garage batch</i> , digestión seca (ST > 15 %)
Control de temperatura	Digestor enterrado sin control de temperatura, con un promedio de 20 °C (régimen mesófilo)	Digestor enterrado sin control de temperatura, con un promedio de 20 °C (régimen mesófilo)	Sistema de calefacción automatizado, con una temperatura de 38 °C (régimen mesófilo a temperatura óptima)
Cámara de digestión	(1) 32 m ³ de hormigón armado H21 con techo de losa y tabique	(1) 40 m ³ de mampostería tradicional con tapa de aluminio	(2) 38 m ³ , contenedores adaptados
Alimentación	200 kg FORSU/día con agregado de estiércol de vaca	400 kg FORSU/día	548 kg FORSU/día
Agitación y recirculación	Agitación mecánica automatizada Tres agitadores de paletas de acero inoxidable, motor de 5 kW. Bomba sumergible tipo rotor abierto para recirculación de 1 HP	Agitación mecánica manual. Tres agitadores de paletas de acero inoxidable. Bomba sumergible tipo rotor abierto para recirculación de 1 HP	Sin agitación. Mezcla por recirculación de digestato
Nivel de automatización	Baja-media	Nula	Alta
Almacenamiento de biogás	Bolsa de HDSP de 25 m ³ y tanque FPV de 2.5 m ³	Campana flotante de 2.5 m ³	Doble membrana de 25 m ³
Tratamiento de biogás	Desulfurador biológico y óxido de hierro. Trampa de agua	Trampas de agua subterráneas	Desulfurador de óxido de hierro y trampas de agua
Otros	Presurizador de biogás		Sistema de recirculación de digestato
Parámetros operativos			
Estimación de producción de biogás	28 m ³ /día	35-50 m ³ /día	98 m ³ /día
Aprovechamiento de biogás	Calefacción de pollos, refrigeración de alimentos (heladera a biogás), hornalla de paila ¹⁵	Cocción de alimentos por medio de hornalla, refrigeración de alimentos (heladera a biogás)	Calentamiento de agua para sistema de calefacción del digestor

¹⁵ Hornalla: Pieza de una cocina o un calentador por donde se difunde el calor para cocer alimentos y sobre la que se ponen las ollas, sartenes, etc.

Disposición/uso del digestato	Riego de pastizales	Riego de árboles frutales	Se recircula. El excedente se envía a un relleno sanitario (por una cuestión de logística municipal).
Medidas de seguridad	Pierna hidráulica que actúa como válvula de seguridad para evitar sobrepresiones/ vacío	Pierna hidráulica que funciona como válvula de seguridad para evitar sobrepresiones/vacío	Apagallamas, pararrayos, sistema de soplado de gas con alto contenido de CO ₂ y de aire limpio, antorcha

Si bien los tres casos descritos se encuentran en distintas etapas de operación, el principal punto de interés es el empleo de tecnologías de digestión anaeróbica en el tratamiento de residuos orgánicos provenientes de los RSU, específicamente, la digestión húmeda y la seca. El monitoreo y estudio de las plantas operativas, junto con el desarrollo de proyectos piloto, permiten establecer premisas y condiciones para dar a conocer casos testigos concretos y reales de biodigestores para RSU.

En este sentido, el primer punto por mencionar es el grado de factibilidad y adaptabilidad de la tecnología de la digestión anaeróbica para el tratamiento y la valorización de RSU. Si bien se presentan distintas configuraciones, tamaños y equipamientos en cada uno de los casos de estudio, el proceso de digestión funciona y es efectiva para el objeto propuesto. Una característica interesante en el diseño de los biodigestores es su configuración en el modo de carga del sustrato: *batch* o flujo en pistón con agitación mecánica, una diferencia que determina desde el inicio un mayor o menor requerimiento en la operación de las plantas.

Esto se observa en la digestión seca, que requiere la instalación de un sistema de prendido y apagado para la carga y descarga del sustrato (propio de una operación discontinua con apertura del digestor), cuyo diseño es completamente automatizado y que presenta válvulas de seguridad para garantizar la no formación de atmósferas explosivas.

Además, supone instalar un sistema de calefacción compuesto por cañerías, aislamiento de biodigestores y un control continuo de la temperatura (una condición específica del diseño propuesto para mantener una temperatura constante de 38 °C). Estas características definen a una planta con mayores controles, automatización y tecnología para garantizar su adecuado funcionamiento. Por el contrario, las plantas de digestión húmeda aquí propuestas carecen de sistemas de calentamiento y alcanzan una temperatura media de 20 °C (dato de diseño corroborado en mediciones efectuadas en la época invernal), que se logra enterrando parte de la cámara de digestión. Esta característica vuelve a este sistema sencillo, robusto y con menor demanda energética.

Otro punto interesante es la escala de los proyectos analizados. Si bien la planta de digestión seca es una planta piloto, su ampliación está diseñada para el tratamiento de los residuos de toda la ciudad de Rafaela, que tiene más de 100 000 habitantes. Por otra parte, las plantas de digestión húmeda localizadas en Ataliva y Emilia tratan los residuos generados por casi 2000 habitantes y su ampliación requeriría condiciones de logística y gestión que dificultan su normal funcionamiento, un aspecto corroborado a través de su monitoreo.

En ocasiones pequeños huesos, vidrios, cortezas o elementos muy duros obstruyen las cañerías de recirculación, agitación y bombas, por lo que se debe detener la operación para eliminar estos elementos o, como acción preventiva, revisar los residuos que ingresan en el biodigestor (ilustración 28). Esta última tarea es la que efectuó en las plantas para evitar situaciones de obturaciones, además de agrandar el diámetro de algunas cañerías.

En otras palabras, la digestión húmeda requiere un sustrato más limpio y de gran pureza (con una mayor concentración de biodegradables), mientras que, en la digestión seca, al no requerirse una mezcla del sustrato (el intercambio se realiza mediante la recirculación del digestato) no se trabaja con equipos con piezas móviles y no se producen obstrucciones. Esto demuestra que la implementación de biodigestores se lleva a cabo idealmente en poblaciones donde se busca generar conciencia en torno a la separación de los residuos domésticos y, a pesar de que estos procesos pueden llevar más tiempo, son los que permiten el reciclaje y la valorización energética, que evitan problemas de contaminación de los residuos.

Ilustración 28. Proceso de alimentación (izquierda) y sustratos de plantas de digestión húmeda (derecha)



Nota: El grado de separación de los residuos resulta clave para garantizar el buen funcionamiento de los biodigestores que carecen de equipo de trituración.

En lo que respecta a la productividad energética de las plantas, se destaca que en ambos sistemas de digestión húmeda la producción de biogás sucede de manera constante y con una elevada proporción de metano (más del 70 %, datos no publicados). Esto ocurre incluso a pesar de la sensibilidad a la calidad del sustrato recién mencionada. De esta manera se evidencia la robustez de la digestión anaeróbica y su potencial para la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los RSU. En particular, la planta de Emilia cuenta con más de 20 años de operación ininterrumpida y provee de energía renovable al área de producción de la escuela de la localidad. Curiosamente, uno de los desafíos a los que se enfrentan las instituciones que operan los biodigestores es cómo gestionar el biogás excedente en épocas donde la demanda disminuye. Un ejemplo de ello es el receso escolar de verano, durante el cual la temperatura es óptima para la producción de biogás que no se utiliza en las actividades curriculares de destino.

Además de los beneficios del tratamiento de los residuos y de la generación de energía, estas plantas de digestión anaeróbica constituyen una fuente de información muy relevante para el estudio y desarrollo de la tecnología. En el caso de los biodigestores que emplean tecnologías más difundidas, como la digestión húmeda, el análisis de su funcionamiento permite validar la correlación entre parámetros como el pH, los valores FOS/TAC y la producción de biogás. Asimismo, se posibilita el análisis y la caracterización del digestato generado, información que, si bien puede ser extrapolada de otras experiencias, depende en gran manera de la tecnología y el sustrato empleado. Obtener datos fisicoquímicos y biológicos sobre este producto es fundamental para poner en valor sus propiedades fertilizantes, la reincorporación de los nutrientes en los suelos productivos y degradados, así como la utilización en espacios verdes, ornamentales y en la producción de alimentos a pequeña y mediana escala.

Por último, es importante mencionar el rol de los actores involucrados en la gestión de las plantas, desde su diseño, implementación y operación, para garantizar la continuidad de los proyectos. Tanto en Emilia como en Ataliva las experiencias demuestran que debe existir una decisión y un trabajo coordinados entre las distintas instituciones que participan en la gestión y operación, en estos casos las escuelas y comunas, así como un compromiso y una distribución en cuanto a los beneficios de la digestión anaeróbica: el tratamiento de los residuos y los productos obtenidos (biogás y digerido o digestato).

2.1.2 Conclusiones y lecciones aprendidas

La digestión anaeróbica es una tecnología utilizable en el tratamiento de la fracción biodegradable de los RSU, la cual presenta condiciones técnicas flexibles y robustas. Además, se puede incorporar a la gestión integral de los residuos y combinar con otros procesos de valorización como el acopio, el reciclaje y el aprovechamiento de residuos inorgánicos, mejorando notablemente la disposición de los residuos en las comunidades.

En relación con los aspectos técnicos del proceso, se identifican distintas tecnologías adaptables a la escala y las características del sustrato. Específicamente, la digestión húmeda requiere un sustrato bien clasificado y limpio, característica que determina una escala de factibilidad en localidades con poblaciones menores a 3000 habitantes y la ventaja de poder funcionar con menos tecnología e infraestructura (sin sistema de calefacción y pretratamiento y con una baja automatización). Por otro lado, la digestión seca posibilita el tratamiento de mayores cantidades de residuos con una menor clasificación en el origen. Esto es posible gracias a que el proceso no implica el uso de equipamiento con piezas móviles sensibles a obstrucciones; sin embargo, la digestión seca sí requiere sistemas más sofisticados y automatizados para garantizar un correcto funcionamiento.

Finalmente, cabe destacar la importancia de establecer estrategias vinculadas a la sostenibilidad en el tiempo de los proyectos de digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos. En ese sentido, se considera imprescindible alcanzar acuerdos entre los actores involucrados en la gestión de la tecnología para lograr una distribución equitativa y diversificar los beneficios de la digestión anaeróbica. Una propuesta es, p. ej., pensar en la producción y el acceso al biogás como un servicio público para las comunidades, enmarcado en el desarrollo

sostenible y sus tres dimensiones (social, económica y ambiental). Este servicio permite tratar los residuos urbanos, disminuir las emisiones de GEI, producir energía renovable de bajo costo para la comunidad, mejorar la calidad de vida de las comunidades y contar con una herramienta de educación ambiental.

2.1.3 Referencias bibliográficas

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Argentina). 2019. Relevamiento nacional de biodigestores: relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico (en línea). Buenos Aires. 80 p. (Colección Documentos Técnicos, n. 6). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.fao.org/3/ca5190es/ca5190es.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Argentina); ME (Ministerio de Economía, Argentina); MAGP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina). 2018. UTF/ARG/020/ARG: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA) (en línea). Buenos Aires, Argentina. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/capacitacion_interna.php?id=180410125602.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina). 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (en línea). Buenos Aires. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoNacional-3-999-Censo-2010>.
- MACC (Ministerio de Ambiente y Cambio Climático, Argentina). s. f. Ambiente Capacita (en línea). Santa Fe, Argentina. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.santafe.gob.ar/ms/ambientecapacita/academia-2-2/>.
- MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Argentina). s. f. Programa Biogás (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/control/biogas>.
- MEM (Ministerio de Energía y Minería, Argentina). 2021. Precios adjudicados del Programa RenovAr: rondas 1, 1.5 y 2 (en línea Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.minem.gob.ar/www/833/25871/precios-adjudicados-del-programa-renovar>.
- Pramanik, SK; Suja, FB; Zain, SM; Pramanik, BK. 2019. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: prospects and constraints. Bioresource Technology Reports 8.
- Routier, A; Rivarosa, F; Blatter, F; Muraro, V; Sosa, F; Jappert, S. 2020. Desarrollo de planta piloto de digestión anaeróbica seca para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (en línea). Revista RedbioLAC (4):23-27. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://redbiolac.org/wp-content/uploads/2020/12/RedBioLAC-2020-3M.pdf>.

2.2 Producción de biogás a partir de residuos de alimentos: unidad de demostración en Belo Horizonte, Brasil

Autores: Tiago Borges Ferreira y Cláudio Leite de Souza

2.2.1 Introducción

Los residuos de alimentos representan pérdidas de recursos energéticos, hídricos y económicos, además de la potencial emisión de GEI (Braguglia *et al.* 2018). Por su fácil biodegradabilidad, su contenido energético y de nutrientes y su elevada humedad se pueden tratar por medio de procesos biológicos como la DA (Paritosh *et al.* 2017, Zhou *et al.* 2018), que posibilitan el aprovechamiento de subproductos como el biogás y el digestato. Según la literatura disponible, las unidades descentralizadas se pueden utilizar en la valorización de estos residuos a través de procesos anaerobios (Choudhary *et al.* 2020, Kuczman *et al.* 2018, Logan *et al.* 2019, Martí-Herrero *et al.* 2019). Dicha valorización descentralizada presenta ventajas económicas y ambientales y contribuye a la economía circular.

En este apartado se presenta una unidad de valorización anaerobia de residuos de alimentos con más de seis años de operación, ubicada en la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil, a fin de demostrar la factibilidad de la gestión de la FORSU en las urbes de América Latina.

2.2.2 Investigaciones previas

El desarrollo del sistema de tratamiento y valorización de los residuos de alimentos producidos en los restaurantes universitarios de la UFMG se basa en un inventario de la producción de residuos orgánicos en el campus, así como en ensayos de potencial bioquímico de metano de los principales residuos (Gomes 2014). Según este estudio, la producción promedio de residuos en el campus universitario es el equivalente a una población de 2600 habitantes.

La unidad

La unidad de tratamiento y valorización de los residuos de alimentos del restaurante universitario mediante la DA, denominada *pMethar*, es parte de una unidad integrada de tratamiento y recuperación de subproductos ubicada en la UFMG, en Belo Horizonte, Brasil. Su capacidad diaria de tratamiento es de alrededor de 500 kg de residuos (Ornelas Ferreira 2015).

La *pMethar* está compuesta por: 1) una unidad de recepción y pretratamiento, 2) una unidad de metanización y 3) varias unidades de separación sólido-líquido y postratamientos de la fase líquida en lagunas de microalgas o en el reactor de oxidación anaerobia del ion amonio (anammox). El análisis de esta experiencia se centrará en las unidades directamente relacionadas con la DA.

Unidad de recepción y pretratamiento

En esta unidad se lleva a cabo la recepción, el pesaje, la clasificación y la trituración de los residuos generados por los restaurantes del campus universitario. Incluye una báscula digital para pesar los contenedores con residuos; una mesa de clasificación de acero inoxidable, donde se hace la segregación, removiendo los huesos vacunos y porcinos y los materiales inorgánicos;

y un triturador industrial (ACX 500 Tritury) para reducir el tamaño de las partículas del sustrato (Ferreira *et al.* 2021a).

Unidad de metanización

El tratamiento anaerobio o metanización se realiza en un biodigestor con mezcla continua (*continuous stirred tank reactor, CSTR*) de 18.8 m³ (ilustración 29). Este biodigestor, construido con fibra de vidrio, tiene un aislamiento térmico de lana de vidrio y una capa externa de acero inoxidable (Ferreira *et al.* 2020b). Además, incluye un sistema de control de temperatura por calentamiento solar con recirculación de agua caliente.

Ilustración 29. Biodigestor anaerobio instalado en la pMethar/UFMG



Fuente: Tomado de Ferreira 2021: 20.

La alimentación del biodigestor y la mezcla se efectúan con una bomba de cavidad progresiva (Nemo Netzsch). En su operación se empleó un régimen de alimentación semicontinuo, con la introducción de sustrato una vez al día y una frecuencia de tres a cinco veces por semana, dependiendo de las condiciones del período operacional. La producción de biogás se monitoreó en medidores de GLP, con un bajo grado de error comprobado en un estudio previo (Ferreira *et al.* 2020b). Tras la medición volumétrica, el biogás se envió a una unidad de tratamiento de limpieza, donde se efectuó la remoción del sulfuro de hidrógeno (H₂S), que se utiliza en investigaciones con un motor de combustión interna.

Otras instalaciones

Adicionalmente, la pMethar posee una etapa de separación de sólidos y líquidos para el efluente de la etapa anaerobia (digestato), además de dos posibles unidades de postratamiento: lagunas de microalgas y reactor de anammox. La información específica acerca de estos dos sistemas se puede encontrar en la literatura (Pereira *et al.* 2019, Torres-Franco *et al.* 2021).

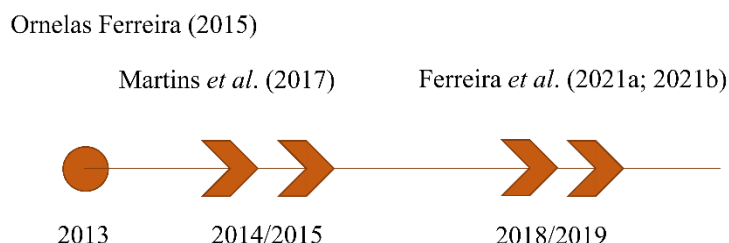
El laboratorio físico-químico de apoyo permite llevar a cabo análisis fundamentales del monitoreo del sistema, como el control de la humedad del sustrato (~5 % de los sólidos totales),

la determinación de sólidos y la demanda química de oxígeno (Rice *et al.* 2012), además del pH y la relación entre alcalinidades intermedia y parcial (Ripley *et al.* 1986).

2.2.3 Operación de largo plazo y distintas configuraciones

En sus más de seis años de operación, la unidad de tratamiento fue sometida a distintas investigaciones, que se presentan cronológicamente en la ilustración 30.

Ilustración 30. Estudios desarrollados en la pMethar/UFGM desde su establecimiento



Puesta en marcha del biodigestor y período inicial de operación

En 2013 se puso en marcha el biodigestor, por medio de un inóculo proveniente de un reactor de UASB utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales. Posteriormente, la operación se efectuó junto con un control de temperatura en rango mesofílico, una tasa de carga orgánica (TCO) con valores promedio de entre 1.3 y 1.6 kg SV m⁻³ d⁻¹ y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de alrededor de 32 días. La remoción de sólidos volátiles (SV) y la producción volumétrica de metano verificada durante este período fue en promedio de 83 % y 0.73 m³ CH₄ m⁻³ d⁻¹, respectivamente (Ornelas Ferreira 2015).

Durante este mismo período operacional, el estudio de la microbiología del biodigestor observó el predominio de arqueas metanogénicas acetoclásticas, como *Methanosaeta* y *Methanospirillum* para TCO más bajas, mientras que una mayor interacción sintrófica y la presencia de arqueas metanogénicas hidrogenotróficas en las TCO más elevadas (Martins *et al.* 2017). Estos resultados demuestran la necesidad de emplear TRH y, principalmente, TCO adecuadas, pues, en general y de forma simplificada, el predominio de la comunidad hidrogenotrófica se relaciona con condiciones operacionales fuera del rango óptimo.

Período en condiciones operacionales simplificadas

Efecto de la variación de la temperatura y del calendario académico

Tras el período inicial descrito, se implementó un segundo período con poco monitoreo y bajas tasas orgánicas (2016-2017). Entre 2018 y 2019, se efectuaron algunas investigaciones en condiciones simplificadas: sin control de temperatura ni pH del biodigestor. El efecto de la variación estacional de la temperatura y la TCO a lo largo del año académico fueron evaluadas. Como resultado, se observó una variación de temperatura de entre 23 °C y 32 °C, además de una TCO de 0.15 a 0.51 kg SV m⁻³ d⁻¹. A pesar de las variaciones de ambos parámetros, solamente la TCO afectó el rendimiento del biodigestor. Durante este período operacional se observó un posible efecto de la acumulación de materiales inertes resultante de la operación de largo plazo; no obstante, durante el período 2018-2019, a través de la valorización se gestionó

alrededor de 16 t de residuos de alimentos y se produjeron 375 m³ de metano, que podrían reemplazar hasta 130 m³ del GLP utilizado en las cocinas del campus (Ferreira *et al.* 2021a).

Efecto de la operación de largo plazo

Tras el período de operación inicial, se incrementó la TCO hasta su sobrecarga para evaluar la capacidad de tratamiento del biodigestor. Durante esta investigación se mantuvieron las condiciones simplificadas de operación, además del análisis de los sólidos acumulados en el interior del reactor. Los resultados llevaron a la conclusión de que, sin la segregación de algunos compuestos como huesos de pollo y sin la remoción posterior de estos fragmentos, la operación de largo plazo puede haber generado condiciones hidrodinámicas desfavorables para la operación. La TCO de 0.4 kg SV m⁻³ d⁻¹ produjo condiciones de sobrecarga orgánica del biodigestor (Ferreira *et al.* 2021b). En general, la reducción de la capacidad de tratamiento de los biodigestores luego de operaciones de largo plazo se reporta en la literatura; por lo tanto, se recomienda su monitoreo (Jaimes-Estévez *et al.* 2021, Kariyama *et al.* 2018).

2.2.4 Consideraciones finales

Un reactor anaeróbico como el presentado en este apartado, ubicado en el campus de la UFMG, puede contribuir a la investigación, la valorización de residuos y la educación ambiental de la comunidad.

La configuración utilizada en esta unidad posibilita distintas investigaciones, desde sistemas con un elevado nivel de control del proceso, hasta operaciones simplificadas; sin embargo, también se pueden desarrollar y difundir unidades más sencillas para alcanzar una función similar.

Con respecto a la cuestión técnica, se recomienda una segregación más estricta y/o una remoción de los sólidos recalcitrantes¹⁶ acumulados para la operación sostenible de largo plazo del reactor.

2.2.5 Referencias bibliográficas

- Braguglia, CM; Gallipoli, A; Gianico, A; Pagliaccia, P. 2018. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: a critical review (en línea). *Bioresource Technology (Part A)* 248:37-56. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.145>.
- Choudhary, A; Kumar, A; Govil, T; Sani, RK; Dutt, G; Kumar, S. 2020. Sustainable production of biogas in large bioreactor under psychrophilic and mesophilic conditions. *Journal of Environmental Engineering* 146(3):1-10.
- Ferreira, TB. 2021. Digestão anaeróbia de resíduos sólidos alimentares: avaliação de diferentes configurações de sistemas simplificados e estratégias operacionais no desempenho do processo. Belo Horizonte, Brasil, UFMG. 164 p.
- Ferreira, TB; Passos, F; Chernicharo, CAL; Souza, C. 2021a. Anaerobic digestion of food waste: effect of the organic load variation in a demo-scale system. *Waste and Biomass Valorization* 12(1).

¹⁶ Los sólidos **recalcitrantes** son aquellos que, por presentar una estructura muy estable químicamente, se resisten al ataque de los microorganismos o de cualquier mecanismo de degradación, sea biológico o químico.

- Ferreira, TB; Passos, F; Souza, CL. 2021b. Long-term operation of anaerobic digestion of food waste under simplified conditions: effect on reactor performance. *Environmental Technology*.
- Ferreira, TB; Souza, CL; Possetti, GRC; Chernicharo, CAL. 2020a. Aplicabilidade de medidor de gás natural tipo diafragma para monitoramento da produção de biogás de reatores anaeróbios de pequena escala. *Revista DAE* 68(224):113-121.
- Ferreira, TB; Torres-Franco, AF; Ferreira, LO; Mota, CR; Souza, CL; Passos, F. 2020b. Digestión anaerobia acoplada a la producción de biomasa microalgal para el tratamiento integrado de residuos de alimentos. *Revista RedBioLAC* 4:70-75.
- Gomes, JC. 2014. Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do campus Pampulha da UFMG. Belo Horizonte, Brasil, UFMG. 94 p.
- Jaimes-Estévez, J; Zafra, G; Martí-Herrero, J; Pelaz, G; Morán, A; Puentes, A; Gomez, C; Castro, LP; Escalante Hernández, H. 2021. Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: complete performance evaluation and microbiological population. *Energies* 14(1):151.
- Kariyama, ID; Zhai, X; Wu, B. 2018. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: a review (en línea). *Water Research* 143:503-517. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418305256>.
- Kuczman, O; Gueri, MVD; De Souza, SNM; Schirmer, WN; Alves, HJ; Secco, D; Buratto, WG; Ribeiro, CB; Hernandes, FB. 2018. Food waste anaerobic digestion of a popular restaurant in Southern Brazil. *Journal of Cleaner Production* 196:382-389.
- Logan, M; Safi, M; Lens, P; Visvanathan, C. 2019. Investigating the performance of internet of things based anaerobic digestion of food waste (en línea). *Process Safety and Environmental Protection* 127:277-287. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.025>.
- Martí-Herrero, J; Soria-Castellón, G; Diaz-de-Basurto, A; Álvarez, R; Chemisana, D. 2019. Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste (en línea). *Renewable Energy* 133:676-684. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014811831214X>.
- Martins, AS; Ferreira, BO; Ribeiro, NC; Martins, R; Leite, LR; Oliveira, G; Colturato, LF; Chernicharo, CA; de Araujo, JC. 2017. Metagenomic analysis and performance of a mesophilic anaerobic reactor treating food waste at various load rates (en línea). *Environmental Technology* 38(17):2153-2163. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2016.1247197>.
- Ornelas Ferreira, B. 2015. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás (en línea). Tesis Mgtr. Belo Horizonte, Brasil, UFMG. 124 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1132M.PDF>.
- Paritosh, K; Kushwaha, SK; Yadav, M; Pareek, N; Chawade, A; Vivekanand, V. 2017. Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling. *BioMed Research International* 2017(2):1-19.

- Pereira, AD; Fernandes, LA; Campos Castro, HM; Leal, CD; Carvalho, BGP; Dias, MF; Nascimento, AMA; Chernicharo, CAL; de Araújo, JC. 2019. Nitrogen removal from food waste digestate using partial nitrification-anammox process: effect of different aeration strategies on performance and microbial community dynamics. *Journal of Environmental Management* 251.
- Rice, EW; Baird, RB; Eaton, AD; Clesceri, LS (eds.). 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington D. C., Estados Unidos de América, APHA.
- Ripley, LE; Boyle, WC; Converse, JC. 1986. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Water Pollution Control Federation* 58(5):406-411.
- Torres-Franco, AF; Silva, G; Freitas, MP; Passos, F; Mota Filho, CR; Figueredo, CC. 2021. Effect of digestate loading rates on microalgae-based treatment under low LED light intensity. *Environmental Technology* 43(20):3023-3036.
- Zhou, M; Yan, B; Wong, JWC; Zhang, Y. 2018. Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: a mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways (en línea). *Bioresource Technology (Part A)* 248:68-78. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.121>.

2.3 Potencial del biogás en Colombia

Autores: José María Rincón Martínez y Jessica Andrea Agresott Ramírez

76

2.3.1 Introducción

En Colombia se han desarrollado estrategias como la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (CONPES 3874 de 2016), los negocios verdes y el impuesto al carbono, entre otras, con el fin de lograr la inclusión de las energías renovables en el mercado nacional. El uso de estas ha demostrado que, además de ofrecer beneficios ambientales, constituyen un motor económico, ya que generan puestos de trabajo que ayudan a diversificar las fuentes de ingresos y estimulan el logro de nuevos avances tecnológicos (Estrada *et al.* 2016).

2.3.2 Generalidades en torno a la biomasa

La biomasa residual (BR) puede ser húmeda o seca. La húmeda es aquella que contiene menos de 15 % de materia seca. En esta categoría se incluyen todos los residuos del tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y el estiércol de animales domésticos como puercos, aves y ganado. Por otra parte, la BR seca es la que contiene más de 15 % de materia seca y se clasifica según el sector productivo que la genera.

La obtención de energía a partir de la biomasa se puede realizar mediante dos vías principales: procesos térmicos, como la combustión, la gasificación y la pirólisis, o procesos biológicos o biotecnológicos, entre ellos la DA (Rincón Martínez y Silva Lora 2014). El uso del proceso térmico o biológico depende de las propiedades de la biomasa: cuando su composición es compleja (p. ej., polímeros reticulados) y hay un alto contenido de lignina, se utilizan preferentemente procesos térmicos, mientras que, cuando existen altos niveles de compuestos biodegradables por microorganismos en la biomasa, se opta por los procesos biológicos.

2.3.3 La DA en Colombia

Dada la importancia de la DA como fuente de energía renovable y de sus productos como sustitutos de los combustibles fósiles en todas sus aplicaciones, es necesario realizar estudios a fondo que apoyen el desarrollo del biogás en Colombia para ampliar el abanico de posibilidades de gestión de residuos y evitar la importación de combustibles fósiles -como el diésel y el gas natural- para contribuir al cumplimiento de los compromisos internacionales adquiridos y el Plan de Desarrollo Nacional.

En términos generales, el biogás es un biocombustible que se compone principalmente de metano (CH_4) (de 45 % a 70 %), de dióxido de carbono (CO_2) (de 25 % a 55 %), así como de otros gases e impurezas, en particular, sulfuro de hidrógeno e hidrógeno (Gerber 2010). En Colombia este no es un tema nuevo, ya que las primeras plantas industriales de biogás se construyeron como complemento del tratamiento de las aguas residuales en Cali, Medellín y Bogotá. En el sector agropecuario dicho tema se ha abordado desde el punto de vista ambiental, llegando a implementarse marcos legales, especialmente en el sector porcino, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

El uso de BR en procesos de DA evita las emisiones de metano al medio ambiente y reduce las de óxido nitroso (N_2O), consideradas como la mayor amenaza provocada por el hombre para la capa de ozono (Ravishankara *et al.* 2009), con un potencial de calentamiento global 300 veces mayor que el del dióxido de carbono. El residuo de la DA, más conocido como digestato, contiene nitrógeno, fósforo, micronutrientes, materia orgánica y elementos menores, lo que lo vuelve idóneo como biofertilizante. Los valores de producción y de rendimiento del biogás a partir del estiércol presentan grandes diferencias debido a su contenido de agua, que varía entre el 10 % y el 90 % del peso fresco del residuo, dependiendo de su edad y origen y las formas de obtención, entre otros.

En el país la Ley 1715 de 2014 promueve el desarrollo de las energías renovables. La responsabilidad social empresarial de algunos sectores liderados por sus gremios ha promovido la firma de acuerdos sectoriales con autoridades ambientales, en los que la DA cumple un rol protagónico. Este es el caso de sectores como el porcino, el avícola y de la palma de aceite, en los que se pretende resolver el problema de la gestión de los vertimientos de residuos industriales líquidos (RILES), aprovechando la energía generada por el biodigestor y el efluente líquido, manejado como un biofertilizante y/o acondicionador de los suelos bajo ciertas condiciones controladas. Igualmente, el sector académico ha promovido la investigación en este tema y universidades como la Industrial de Santander, la Nacional, la ICESI, la Antioquia, las Américas y la del Atlántico han desarrollado proyectos utilizando diferentes fuentes de biomasa en diferentes sectores, lo que ha solucionado problemas puntuales del sector agropecuario en la región de influencia (Rincón *et al.*, 2018).

En consecuencia, debido a la creciente demanda de energía y a la cantidad de residuos generados anualmente, se requiere conocer el potencial del biogás en Colombia con el fin de apoyar la transición energética e implementar metodologías de economía circular.

2.3.4 Potencial del biogás en Colombia

En 2018 la Universidad Nacional de Colombia y la empresa Tecsol Ltda. llevaron a cabo un estudio para la UPME en relación con el potencial del biogás en Colombia (UNAL y TECSOL Ltda. 2018). A continuación se presenta un breve resumen de este trabajo.

Inicialmente se definió el grado de disponibilidad de biomasa residual en cada sector, partiendo del Atlas de Biomasa y de información sobre la producción, obtenida mediante informes del MADS y del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Posteriormente se realizó el cálculo de la cantidad de biomasa residual y de su potencial energético, empleando índices de generación de residuos de acuerdo con la información de las entidades nacionales responsables, datos extraídos de la literatura disponible, así como información de los distintos sectores (agrícola, pecuario, industrial y urbano), a fin de estimar el potencial energético de cada biomasa.

2.3.4.1 Estimación de la disponibilidad de biomasa residual

En la situación actual la mayor parte de los residuos avícolas y porcinos se puede recolectar para su tratamiento y utilización en la generación de biogás. Dado que todos los pequeños propietarios rurales poseen animales de corral, estos pueden producir, junto con la BR agroindustrial, el biogás necesario para la cocción de alimentos, a fin de evitar problemas de pobreza energética, salubridad y deforestación del campo. Algunas agroindustrias de producción intensiva como la de caña, palma y banano pueden instalar plantas individuales de DA alimentadas con residuos para la autogeneración. Además, es importante evaluar grandes proyectos asociativos de utilización de biogás en la generación eléctrica o de biometano en el transporte vehicular.

Los residuos biodegradables son los que generan malos olores en los rellenos sanitarios y botaderos de basura. Debido a su descomposición, ocurren vertimientos que contaminan las aguas y que pueden producir enfermedades (infecciones respiratorias, parasitosis intestinales y diarrea, entre otros). Además, hay que considerar que los residuos biodegradables arrastran otros compuestos presentes en los demás residuos, que van a dar al relleno sanitario o botadero (desde aparatos eléctricos, hasta medicamentos en desuso, entre muchos otros).

En la actualidad una solución a dicho problema es la separación *in situ* de estos residuos (segregación en origen) y su tratamiento en plantas de DA donde se produce biogás, que posteriormente se utiliza en la producción de electricidad o se purifica hasta convertirlo en biometano, que se puede usar como combustible de transporte. Esta práctica de valoración energética permite incrementar el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios, evitar emisiones de metano al ambiente y explosiones de los rellenos sanitarios, además de recircular en los suelos los nutrientes contenidos en los residuos biodegradables (digestato), para sostener la agricultura y la producción de alimentos. En Colombia la dinámica de aprovechamiento del biogás por DA de la FORSU es reciente. A continuación se muestran las biomazas residuales identificadas en cada uno de los sectores (véase la tabla 4).

Tabla 4. Biomosas identificadas y cantidad y tipo de residuos de los diferentes sectores productivos

	SECTOR	TIPO DE RESIDUO	CANTIDAD RESIDUO (t/año)
Biomasa residual agrícola	Arroz	Paja	2 078 073
	Banano	Fruto de rechazo	2 067 945
	Pulpa de café	Pulpa	298 996
	Mucílago de café	Mucílago	102 243
	Borra de café	Borra	18 532
	Maíz	Caña	912 659
	Palma de aceite	Laguna de oxidación	6 709 985
	Plátano	Fruta de rechazo	23 816 051
	Caña de azúcar	Bagazo	6 972 609
	Caña panelera	Bagazo	364 066
	Total		43 341 159
Biomasa residual pecuaria	Avícola	Estiércol	6 518 795
	Porcino	Estiércol	2 745 392
	Bovino	Estiércol	83 497 181
	Total		92 761 368
Biomasa residual agroindustrial	Lácteo	Grasas, lodos	37 125
	De la cervecería	Lodos	789 230
	De la destilería	Vinazas	9 587 333
	Matadero	Rumen	103 581
	Total		10 517 269
Biomasa residual urbana	RSU	FORSU	9 845 875
	Lodos PTAR	Lodos	19 422 647
	Total		29 268 522
TOTAL			175 888 318

Fuente: Adaptado de UNAL y TECSOL Ltda. 2018.

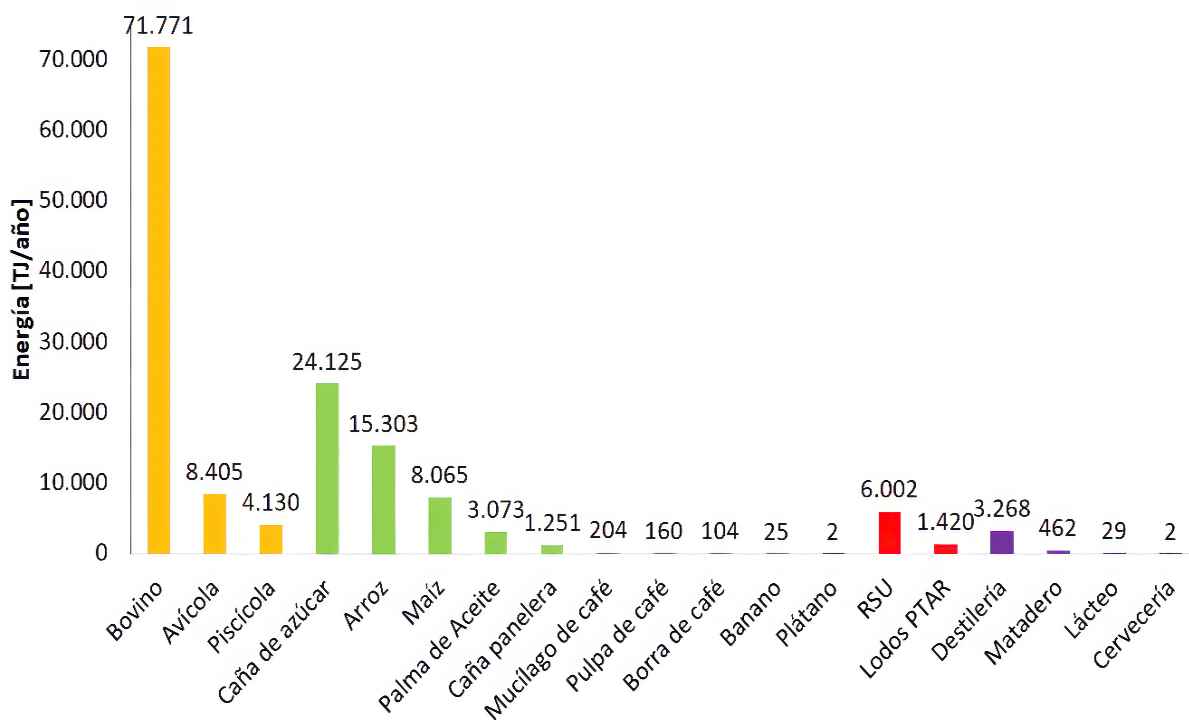
Tras obtener la cantidad total de residuos disponibles, se determinó el potencial teórico de generación de biogás en el país.

2.3.4.2 Potencial teórico de generación de biogás

El potencial teórico de generación de biogás corresponde a la cantidad de biogás que se puede generar por medio del proceso de DA a partir de las biomosas residuales identificadas anteriormente. Este potencial se determina a través del uso de valores teóricos de la fracción de materia orgánica contenida en la biomasa, así como de la productividad específica de biogás de los distintos tipos de biomasa disponibles.

En el gráfico 5 se presenta el potencial energético de cada una de las biomásas con cuya sumatoria se obtiene un potencial total de 147 801 TJ/año.

Gráfico 5. Potencial energético de cada una de las biomásas seleccionadas



Fuente: Tomado de Rincón *et al*, 2018: pág. 16-25.

La gestión de residuos biodegradables en biodigestores presenta una serie de ventajas, como la de ser un proceso de producción de energía renovable a partir de residuos orgánicos biodegradables en reactores anaeróbicos, con lo cual se disminuye la emisión de GEI, la contaminación ambiental y los malos olores generados por la inadecuada disposición de los residuos, entre otros.

En el ámbito rural se considera que las tecnologías desarrolladas en países como China, India y Taiwán están bien establecidas en términos de su adecuación y que, por lo tanto, es importante realizar trabajos de evaluación y transferencia a nuestro medio, teniendo en cuenta los incentivos y la cadena de valor de los productos del proceso de DA. Asimismo, junto con las evaluaciones de transferencia, se deben efectuar estudios para la instalación de microrredes de energías renovables, a fin de complementar la tecnología de DA con otras fuentes de energía renovable no convencionales (como la solar y la eólica) para suplir todas las necesidades energéticas de forma complementaria las 24 horas del día y disponer de energía sostenible para el desarrollo de las actividades del campo.

En este sentido, la economía de escala es muy importante, por lo que se deben evaluar posibles asociaciones para la instalación de plantas de generación eléctrica y de producción de biocombustibles derivados. Además, se debe evaluar los valores evitados, como los daños a la salud de los habitantes de la localidad o de los barrios cercanos, así como la posibilidad de instalar redes de suministro de biogás en los municipios donde se carece de suministro de gas natural. En el caso de ciudades con poblaciones mayores a los 400 000 habitantes, la implementación de plantas de generación de biogás sirve para la autogeneración de energía

eléctrica y biometano para su uso en el transporte público de pasajeros. La generación con biogás es totalmente confiable, por lo que es posible aspirar a la obtención de un pago por confiabilidad¹⁷ (UNAL y TECSOL Ltda. 2018).

El desarrollo del biogás como una de las estrategias de desarrollo sostenible del país supone una demanda de personal calificado para llevar a cabo el diseño y cálculo de los biodigestores, la construcción de los equipos y el manejo de las plantas. También genera empleo en el campo en la recolección y el transporte de desechos agropecuarios y en el mantenimiento de las plantas y redes de distribución. En consecuencia, también crea una demanda de personal en el campo que evita la migración a la ciudad (UNAL y TECSOL Ltda. 2018).

2.3.5 Conclusiones

En Colombia el potencial del biogás producido a partir de residuos biodegradables es de 147 801 TJ/año; sin embargo, entre los principales obstáculos para su aprovechamiento se incluyen: 1) el desconocimiento sobre sus beneficios y el diseño, el montaje y la operación de las plantas de DA, 2) las dificultades para financiar estos proyectos de manera individual (para autoabastecimiento) y 3) la ignorancia de la existencia de incentivos y planes de apoyo del Gobierno dirigidos a la implementación de esta tecnología.

2.3.6 Referencias bibliográficas

- Estrada, C., Islas, J., Flores. W. 2016. Capítulo 3: Energía renovable, Las inmensas oportunidades de energía renovable en sus múltiples formas. Guía hacia un futuro energético sustentable para las Américas. México Distrito Federal: IANAS, The Inter-American Network of Academies of Sciences. Página 67. Disponible en https://www.interacademies.org/sites/default/files/publication/guide_toward_a_sustainable_future_for_the_americas-spanish.pdf
- Gerber, M. 2010. Modelling of material and energy balance of biogas production process (en línea). In GERG Academic Network Event (2, 2010, Bruselas, Bélgica. Presentación. Bochum, Alemania, RUB. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://pdf4pro.com/amp/view/modelling-of-material-and-energy-balance-of-biogas-47aae6.html>.
- Ravishankara, AR; Daniel, JS; Portmann, RW. 2009. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century (en línea). Science 326(5949):123-125. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.1176985>.
- Rincón Martínez, JM; Silva Lora, EE (eds.). 2014. Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad. Bogotá, Colombia, CYTED. 332 p.
- UNAL (Universidad Nacional de Colombia); TECSOL Ltda. 2018. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento: informe final. Bogotá D. C., Colombia, UPME. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/1317/Informe%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

¹⁷ La resolución CREG 071 de 2006 define el cargo por confiabilidad como la remuneración que se paga a un generador por la disponibilidad de activos de generación con las características para garantizar el cumplimiento de la Obligación de Energía Firme que le fue asignada en una subasta.

Rincón, J; Durán, D; Quintero, O; Duarte, S; Guevara, P; Velásquez, M. 2018. Disponibilidad de biomasa residual y su potencial para la producción de biogás en Colombia. Revista CITED. Edición 19: Observatorio colombiano de energía. Pag, 16 – 25. ISSN 2145-2938. Disponible en <http://revista.cidet.org.co/revistas/revista-19/disponibilidad-de-biomasa-residual-y-su-potencial-para-la-produccion-de-biogas-en-colombia/>

2.4 Potencial de producción de biogás en Costa Rica

Autor: Asobiogás

En 2017 la Asobiogás lideró un estudio para cuantificar el potencial del biogás de Costa Rica (Viquez 2017), del cual a continuación se presenta un extracto.

El estudio tomó en cuenta únicamente sustratos de origen orgánico con potencial de fermentación a metano. La información recolectada se dividió por:

- **Sector.** Se trata de la industria de la cual proviene el residuo considerado, p. ej., si es broza de café, el sector es “café”. Los sectores considerados para este análisis fueron: 1) el de los cultivos de: **café, caña de azúcar, piña, cítricos, palma aceitera y banano**; 2) el del estiércol de animales, principalmente de ganado vacuno (**carne, leche y doble propósito**), **avícola y porcino**; y 3) el urbano, correspondiente a **residuos orgánicos y aguas residuales de origen domiciliario**. Se omitieron las aguas residuales de origen industrial (ilustración 31) (incluidos los lodos primarios y secundarios) por falta de información acerca del sector.
- **Zona geográfica.** Cada estimación del potencial de metano se efectuó por zona: Central, Chorotega, Brunca, Huetar Norte, Huetar Caribe y Pacífico Central.

Esta estimación se realizó haciendo un cálculo del residuo, multiplicando la producción del sector (tomando como base el área de cultivo y su índice promedio de producción, p. ej., 334 206 tMF de banano/año) según un factor (siguiendo los indicadores de la industria, p. ej., 0.094 tMF¹⁸ pinzote/tMF banano). La cantidad final de residuos expresada en materia fresca se multiplica por el contenido de ST, luego por su contenido de SV_{bs} y, finalmente, se multiplica por su rendimiento de metano^{19 y 20} (m³ CH₄/kg SV).

Cabe destacar que esta es una estimación de un potencial, debido a lo cual se fundamenta en el total de residuo generado y no necesariamente en la cantidad de residuo disponible, recolectado o utilizado para otro fin (compostaje, alimentación de animales, fertilización de cultivos, etc.).

¹⁸ La abreviatura tMF corresponde a tonelada de materia fresca.

¹⁹ El rendimiento del metano se determinó con base en referencias literarias.

²⁰ Ejemplo de la estimación: 31 415.36 tMF x 8 % ST x 80.5 % SV_{bs} x 0.256 m³ CH₄/kg SV x 1000 kg/t = 517 926.25 m³ CH₄/año.

Ilustración 31. Ejemplos de residuos disponibles en Costa Rica utilizados en la estimación del potencial de biogás



En resumen, según este análisis, Costa Rica tiene un potencial de producción de **377 000 000 m³ de CH₄/año**, equivalente a más de 1 000 000 m³ de metano por día. Convertidos en potencia eléctrica, es el equivalente a 165 MW de capacidad instalada, lo que representa aproximadamente un 5 % de la necesidad del país.

Las zonas en Costa Rica con mayor potencial (casi 71 %) son la Huetar Norte, la Central y la Chorotega, las de mayor producción agrícola del país.

Según se muestra en el gráfico 6, el sector ganadero, específicamente el vacuno, es el que tiene el mayor potencial, sumando más del 56 % del potencial máximo, incluido el ganado de leche, de doble propósito y de carne.

Gráfico 6. Potencial porcentual de producción de metano según el sector considerado en el análisis



Fuente: Tomado de Víquez 2017: párr.4

2.4.1 Referencias bibliográficas

Viquez, J. 2017. Determinación del potencial de biogás a nivel nacional. San José, Costa Rica, Asobiogás, 2017.

2.5 Potencial de generación y aprovechamiento de biogás a partir de residuos de la agroindustria frutícola en el semiárido brasileño

Autoras: Miriam Cleide Cavalcante de Amorim y Paula Tereza de Sousa e Silva

2.5.1 Introducción

En los últimos años la búsqueda de métodos de reutilización de residuos agroindustriales ha sido objeto de varias investigaciones. Brasil, por sus condiciones climáticas y sus vastas extensiones de tierra productiva, se encuentra entre los mayores productores de alimentos del mundo, destacándose en la fruticultura (Ferreira *et al.* 2017).

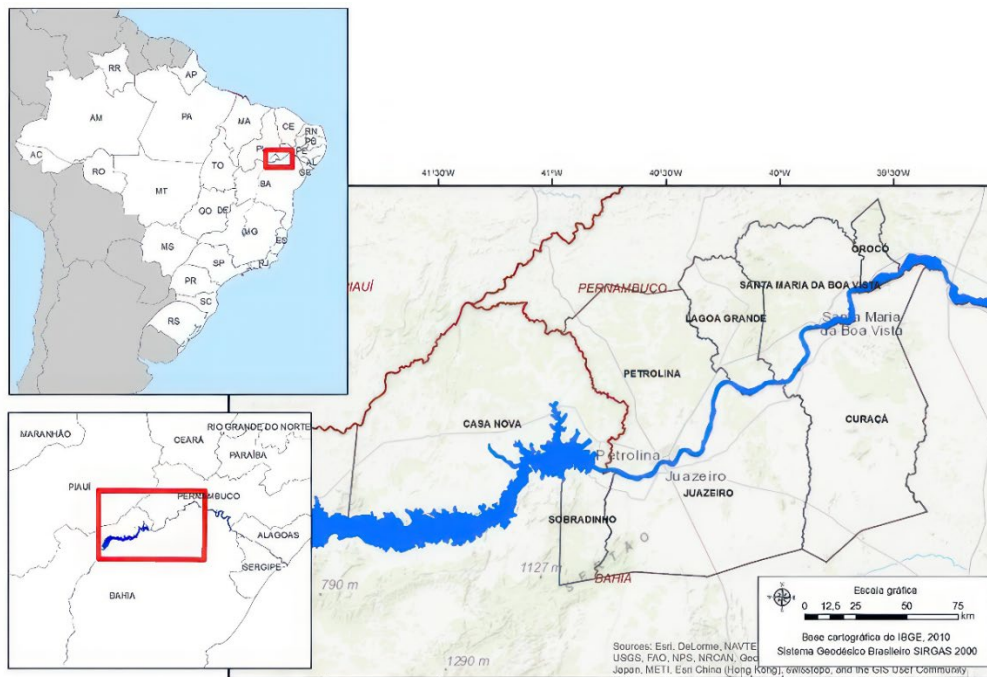
La fruticultura es uno de los segmentos más importantes de la agricultura brasileña, pues da cuenta del 25 % del valor de la producción agrícola nacional. En 2017 la región del submedio San Francisco, en el semiárido brasileño, representó el 29 % del valor de la producción frutícola nacional (Vidal 2019). En 2018 Brasil fue el tercer mayor productor de frutas, con 43 000 000 t (ABRAFRUTAS 2019, FAO 2019). En los últimos años el país ha incrementado su área productiva a un ritmo nunca visto, ampliando sus fronteras hacia la región Nordeste, en particular, a la región semiárida.

Si bien en el semiárido brasileño las lluvias se concentran durante tres o cuatro meses del año y periódicamente se producen largas sequías que pueden durar varios años, las condiciones de luminosidad, humedad relativa y temperatura asociadas a la disponibilidad de agua del río San Francisco favorecen la fruticultura de regadío.

En la región del submedio del valle del río San Francisco la actividad económica se centra en el riego, principalmente en la fruticultura irrigada. Esta práctica fomentó un enorme dinamismo en la economía y la estructura urbana que transformó a esta región en la aglomeración urbana más próspera de dicho valle.

Tales condiciones allanaron el camino para la expansión de las zonas cultivadas, destacándose los municipios de Petrolina, en Pernambuco, y de Juazeiro, en Bahía, en donde se concentra la mayor parte de la producción del valle. Además, esa acción promovió la unión de otros municipios circunvecinos con potencial hacia la modernización y diversificación agrícola (Leão y Moutinho 2014). Ello llevó a la creación de la **Región Integrada de Desarrollo (RIDE)** del Polo Petrolina (Pernambuco) y Juazeiro (Bahía), establecida mediante la Ley Complementaria n.º 113 del 19 de septiembre de 2001 y reglamentada por medio del Decreto n.º 4366 del 9 de septiembre de 2002. La RIDE abarca cuatro municipios de Pernambuco (Petrolina, Lagoa Grande, Santa Maria da Boa Vista y Orocó) y cuatro de Bahía (Juazeiro, Casa Nova, Sobradinho y Curaçá), tal como se muestra en la ilustración 32.

Ilustración 32. RIDE Polo Petrolina/Juazeiro



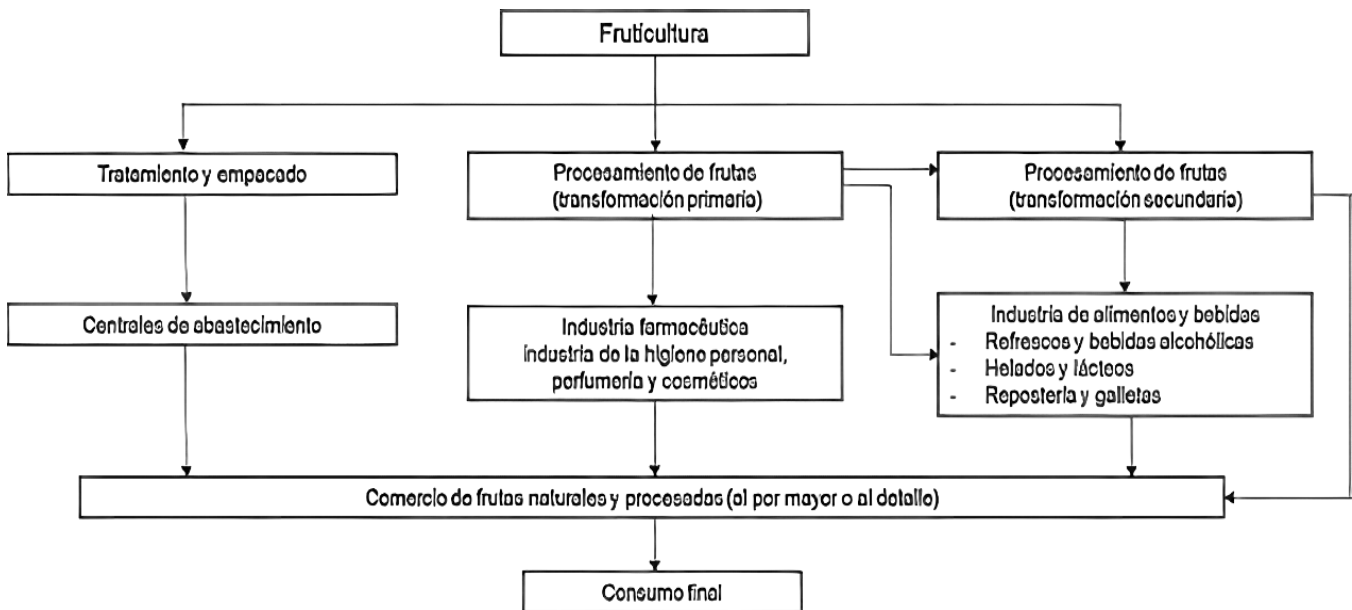
Fuente: Tomado de SIRGAS 2000:3

La región es responsable del 27 % de la producción nacional de frutas, sobre todo, de coco, guayaba, papaya, mango, maracuyá, piña y melón (Vidal y Ximenes 2016). En ella predominan los cultivos perennes, especialmente los de mango, coco, guayaba y uva, que son cultivados en proporciones de 71.1 %, 29.8 %, 26.6 % y 26.2 %, respectivamente, por trabajadores rurales en los perímetros irrigados de los municipios de Petrolina y Juazeiro (Corcino *et al.* 2019). La región Nordeste de Brasil, la segunda mayor región productora de uva del país, contribuye con el 34.46 % de la producción nacional (Mello 2020). La gran mayoría de los frutos cultivados se destinan a la exportación. Según el Instituto Brasil África (IBRAF) (s. f.), Brasil es el vigésimo mayor exportador del mundo, mientras que la región semiárida del submedio del río San Francisco exporta el 65 % de dicho producto a Europa y Estados Unidos.

No obstante, además de la fruticultura, la agroindustria de procesamiento de frutas también se ha consolidado en la región del submedio San Francisco. La incorporación de nuevas tecnologías de riego, de tratamientos en cultivos y poscosecha se ha ampliado en la agroindustria del procesamiento de frutas. El sector vitivinícola destaca por la producción de vino y jugos en sus dos formas: integral y de concentrados, así como por la elaboración de mermeladas y jaleas. De esta manera, el desarrollo del sector agropecuario se ha diversificado a través de actividades de fruticultura bajo riego, vitivinicultura, procesamiento de acerola, industria del sucroalcohol y procesamiento de guayaba para la elaboración de dulces (Vidal 2019).

El complejo agroindustrial de la fruticultura comprende básicamente la producción agrícola (fruticultura); el procesamiento de la fruta (transformación primaria y secundaria), incluido su uso como insumo para diversas industrias (alimentos, bebidas, cosmética y farmacéutica); y su comercialización mediante las redes de comercio mayorista o minorista (ilustración 33) (ABDI 2008).

Ilustración 33. Complejo agroindustrial de la fruticultura



Fuente: Adaptado de Cunha, 2008

El procesamiento de frutas, además de tener potencial nutricional y económico, es una actividad que también genera residuos. En el ámbito mundial la agroindustria frutícola produce millones de toneladas de subproductos. La producción de jugos y pulpa genera entre el 30 % y el 40 % de los residuos agroindustriales, como cáscaras, semillas, pulpa e incluso el fruto entero, cuando no cumple con los estándares industriales (Nascimento Filho y Franco 2015).

También se destacan los residuos líquidos agroindustriales o efluentes agroindustriales, que son residuos líquidos provenientes de diversas actividades realizadas en la agroindustria y que contienen desde productos derivados de materias primas (orgánicas), hasta diversos productos químicos utilizados en los procedimientos de limpieza, en la arena y los lubricantes que se diluyen en el agua de limpieza de equipos, tuberías, pisos y otras instalaciones industriales.

Por su alto contenido de materia orgánica en su composición, los residuos de frutas tienen potencial bioenergético a partir de procesos biotecnológicos en la producción de biogás. Las tecnologías basadas en la biodigestión anaerobia de residuos orgánicos posibilitan la producción de biogás derivado de subproductos del sector frutícola, lo que constituye un desafío para el sector.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los residuos sólidos o líquidos pueden agregar valor a esa cadena productiva por medio de la aplicación de la biodigestión anaerobia para obtener productos con mayor valor agregado y, al mismo tiempo, minimizar los impactos negativos en el medio ambiente. Esta estrategia tiene como objetivo transformar las materias primas en bienes útiles sin dañar el medio ambiente, utilizando los desechos y las emisiones como insumos para otros productos (Israel 2005). En el plan (PLANARES) se destaca que, como alternativa a la disposición final, los residuos orgánicos pueden ser reciclados, y que la DA es una de las principales alternativas para su aprovechamiento (MMA 2020).

Considerando que la inserción de la actividad agroindustrial en el sector frutícola brasileño también aumenta la generación de residuos o subproductos en Brasil y, específicamente, en el semiárido de la región del submedio San Francisco, la utilización biotecnológica de estos subproductos puede ser una alternativa viable con potencial para generar biogás, ya que esta es la segunda región frutícola más grande del país.

2.5.2 Residuos sólidos y efluentes: aspectos legislativos en Brasil

En 1981 Brasil estableció su política de protección ambiental a través de la Ley Federal n.º 6938 de 1981, conocida como Política Nacional de Medio Ambiente, en la que se definieron objetivos y mecanismos dirigidos a asegurar la conservación, mejora y recuperación de una calidad ambiental favorable a la vida, garantizando las condiciones para el desarrollo socioeconómico y la protección de la dignidad de la vida humana.

Esta política sentó las bases de otros marcos legales brasileños que dieron lugar a importantes legislaciones, como la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) de 2010 (Ley Federal 12 305 del 2 de agosto de 2010, que establece los requisitos para la gestión de los residuos industriales y asigna a las empresas la responsabilidad de establecer procedimientos para la reducción y eliminación ambientalmente correcta de los residuos generados en su actividad. La PNRS establece específicamente que los responsables de las actividades agrosilvopastoriles están sujetos a la elaboración del Plan de Gestión de Residuos Sólidos y que, en esta definición, se incluyen los residuos de las actividades agroindustriales.

Los dos estados de la región integrada de desarrollo económico: Pernambuco y Bahía, también cuentan con sus respectivas leyes estatales sobre residuos sólidos. En Pernambuco la Ley 14 236 del 13 de diciembre de 2010 establece las directrices generales aplicables a los residuos sólidos, así como los principios, los objetivos de la gestión integrada y la administración.

En Bahía se sancionó la Ley PERS n.º 12 932/2014, que engloba la Política Estatal de Medio Ambiente y Protección de la Biodiversidad (Ley n.º 10 431/2006), así como la Política Estatal de Saneamiento Básico (Ley n.º 11 172/2008), cuyos objetivos son la no generación, la reducción, la reutilización, el reciclaje y el tratamiento de los residuos sólidos y la eliminación final ambientalmente adecuada de los desechos, determinando la adecuación de la gestión integral de los residuos sólidos. Además, en el artículo 33 se establece que el estado podrá otorgar beneficios o incentivos fiscales a aquellas empresas que desarrollen sistemas de gestión ambiental para mejorar los procesos productivos que redunden en la reducción de los impactos generados por sus residuos sólidos, una forma de que las empresas se adapten a los requisitos impuestos y eviten el castigo.

En el PLANARES (MMA 2020), un documento que forma parte de la PNRS, se plantean metas, directrices y estrategias, lo que lo convierte en un importante instrumento de gestión de residuos en Brasil, donde se aborda el manejo de los residuos y su disposición final. En él se explica que los residuos orgánicos se pueden reciclar y valorizar, presentando la digestión anaeróbica como la principal alternativa para su aprovechamiento. Además, en el inciso XIV del artículo 7 se prevé la recuperación y el uso de la energía.

2.5.3 Panorama de la agroindustria frutícola en Brasil y en el semiárido: producción, procesamiento y generación de residuos

2.5.3.1 Producción frutícola

Brasil es el tercer mayor productor de frutas del mundo, representando el 45,9% del total mundial, con el 4,6% del volumen cosechado y una producción de 39,9 millones de toneladas (Andrade, 2020). Las mayores áreas sembradas de frutales en Brasil están en el Nordeste, con 52%, seguido por el Sudeste, donde se encuentra el 26% del área sembrada en el país (Vidal, 2021). Los Estados de São Paulo, Bahía, Rio Grande do Sul y Minas Gerais se destacan como los principales productores, con destaque para el Valle de São Francisco, importante polo de fruticultura irrigada con base en Petrolina-PE/Juazeiro-BA, que tiene de riego enfocado a la producción de mango y uva de mesa. (Andrade, 2020).

Bahía y Pernambuco son responsables por el mayor porcentaje del valor de la producción generada por la fruticultura (32% y 22% respectivamente); Esto se debe, en gran parte, a la producción de cacao y banano en Bahía y de uva y mango en el Polo. Más del 30% de la producción nacional de uva y mango se concentra en el Valle de São Francisco, con los principales cultivos explorados en el polo (Vidal, 2021).

La Región Noreste es de gran importancia en el cultivo de la mayoría de las especies de frutas tropicales, entre las principales piña, aguacate, plátano, marañón, coco, papaya, mango, maracuyá, uva, acerola y guayaba (Losada., 2006; Vidal, 2021). En la Sub-Media Región de São Francisco, existen alrededor de 100.000 hectáreas de cultivo bajo riego, destacándose como uno de los dos principales polos agrícolas del Nordeste brasileño, donde se cultivan con éxito comercialmente varios árboles frutales.

Según datos de ABRAFRUTAS (2021), a diferencia de muchos otros cultivos afectados durante 2020, debido a la pandemia provocada por el nuevo coronavirus, la producción y exportación de fruta alcanzó la marca de más de 1 millón de toneladas de fruta exportada, con un aumento del 6%. respecto a 2019. Destacarán mangos y uvas con producciones de 243.225 y 49.325,8 toneladas.

La acerola es una fruta con creciente protagonismo en la industria de pulpas y jugos, ya que, además de tener un agradable sabor, es rica en compuestos bioactivos, como ácido ascórbico y fenoles. Originaria del Caribe, Centroamérica y el norte de Suramérica, se le conoce como “cereza de las Antillas” o “cereza de Barbados”.

Brasil presenta condiciones climáticas favorables para la producción de acerola, que ha ido en constante aumento y ya despertó el interés de productores y consumidores brasileños y extranjeros. Los estados del nordeste se destacan por dar cuenta de alrededor del 60 % de la producción nacional, seguidos por la región Sudeste, donde se genera aproximadamente el 15 % (Furlaneto y Nasser 2015). Pernambuco se destaca como productor, al generar cerca del 23.11 % de la producción, seguido por los estados de Ceará (14.32 %), São Paulo (11.39 %) y Bahía (10.48 %) (EMBRAPA 2012).

Uva. En Brasil la viticultura tiene particularidades relacionadas con las condiciones edafoclimáticas, el ciclo de producción, el tiempo de cosecha, los cultivares (vástago y

portainjerto), las prácticas de cultivo, el tipo de producto y el enfoque de mercado (Mello y Machado 2021). Estas particularidades se observan en el consumo de uvas frescas y en el segmento de uvas para procesamiento, principalmente para la producción de jugo y vino espumante.

Según datos recientes del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), en 2020 en Brasil había cerca de 74 826 ha sembradas con vides, destacándose que el 73.12 % de esa superficie estaba en la región Sur y el 13.94 %, en la región Nordeste (IBGE 2020).

En el nordeste la viticultura se concentra en el valle de San Francisco, abarcando los estados de Pernambuco y Bahía. El gran factor diferenciador de esta región es el número de cosechas por año, que puede variar hasta las dos y media, por lo que se destaca en el ámbito nacional por sus altos rendimientos, alta productividad y la calidad de la uva y sus vinos, bebidas espumosas y jugos.

En el valle de San Francisco la mayoría de las uvas de mesa producidas son de variedades sin semillas, ya que se orientan a nichos en los mercados interno y externo. En cuanto al mercado exterior, en 2020 los principales países exportadores fueron Holanda (puerto de entrada de las exportaciones brasileñas en Europa), Reino Unido y Estados Unidos. Los productos procesados (vinos, bebidas espumantes y jugos) se dirigen en mayor medida al mercado interno.

En lo tocante a la zafra de 2021, el IBGE, en su encuesta sistemática de febrero (LSPA), registró un aumento significativo en la producción (13 %), destacándose los estados de Rio Grande do Sul (19 %), Pernambuco (15 %) y Bahía (9 %) (tabla 5).

Tabla 5. Producción de uva en toneladas en los principales estados productores

	2018	2019	2020	2021
Rio Grande do Sul	823 698	667 018	735 356	875 441
Pernambuco	426 392	456 080	338 837	390 603
São Paulo	138 055	149 064	148 919	147 359
Bahía	60 524	71 939	45 342	49 973
Santa Catarina	58 261	58 975	60 388	55 255
Paraná	57 039	53 396	57 556	57 000

Fuente: Adaptado de IBGE 2019, IBGE 2021 y Kirts *et al.* 2021.

2.5.4 Procesamiento agroindustrial de frutas en el valle de San Francisco

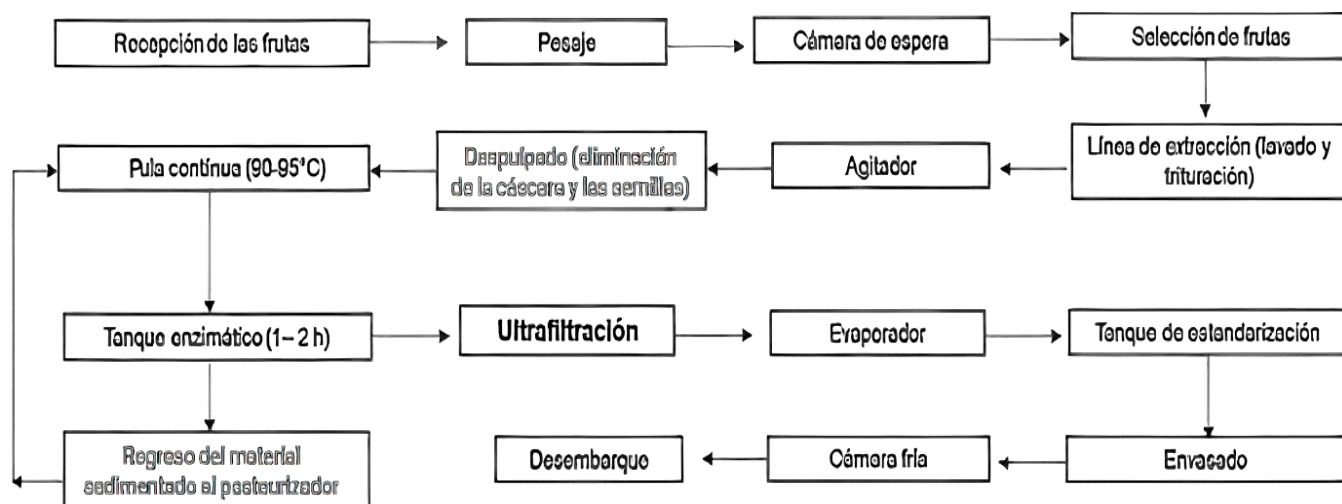
2.5.4.1 Acerola

Esta fruta tiene potencial para su industrialización, ya que puede ser consumida en forma de jaleas, confituras y mermeladas y ser procesada para el suministro de compuestos al mercado de cosméticos y en la industria farmacéutica para producir complementos alimenticios y cápsulas de vitamina C (Godoy *et al.* 2008, Sobrinho 2014, Souza *et al.* 2017). Tales características propician su procesamiento agroindustrial, lo que se ve favorecido por el flujo de esta fruta en el mercado consumidor, principalmente por su alta perecibilidad en el período poscosecha.

En el mercado interno brasileño el 46 % de la producción de acerola se destina a la industria de procesamiento de frutas y el resto, al consumo como fruta fresca (EMBRAPA 2012). En la región del submedio San Francisco el cultivo de acerola tiene lugar en el Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, cubre una superficie de 1339 ha y muestra una tendencia al crecimiento (EMBRAPA 2012).

La presencia de la agroindustria de la acerola se ha consolidado en varios estados productores brasileños. En la RIDE Polo Petrolina/Juazeiro se destaca NIAGRO-NICHIREI do Brasil Agrícola Ltda., establecida en 1980 en Petrolina, estado de Pernambuco. Esta empresa, que constituye el único productor en el mundo de productos de acerola, entre ellos el jugo concentrado y el jugo concentrado y clarificado, cultiva la fruta, la procesa y distribuye sus productos. Además, comercializa acerola fresca (Niagro Nichirei do Brasil Ag. Ltda. 2021). En NIAGRO el procesamiento de esta fruta se lleva a cabo según los pasos detallados en la ilustración 34.

Ilustración 34. Flujo de procesamiento en la empresa NIAGRO



90

Fuente: Elaborado con base en Barros 2017.

2.5.4.2 Uvas

En las regiones brasileñas la vitivinicultura está en pleno desarrollo, ocupando un área de 82 000 ha (OIV 2019). Previamente centrada en la región Sur, hoy hay actividad en las regiones Centro Oeste y Nordeste. En la región del valle de San Francisco se cultiva uva desde hace cerca de 30 años. La región Nordeste da cuenta de aproximadamente el 35 % de la producción nacional de uvas y es la segunda región productora de la fruta del país. Además del cultivo de uvas destinadas a la exportación, se destaca la producción de vinos tropicales y de jugos y concentrados en el submedio San Francisco, donde se encuentra la RIDE Petrolina/Juazeiro (Pereira *et al.* 2009).

En 2018 la producción nacional de uva destinada a la elaboración de vino, jugo y sus derivados fue de 698 045 t, lo que representó más del 48 % de la producción total de la fruta (Filter y Beling 2017). El resto se destinó al consumo de fruta fresca. Según datos de la Empresa de Desarrollo de los Valles de San Francisco y Parnaíba (CODEVASF 2021), en 2017 la producción total de uvas a lo largo del río San Francisco fue de 274 000 t, en un área de 6793 ha.

La RIDE Polo Petrolina (PE)/Juazeiro (BA) posee la mayor cantidad del área sembrada con viñedos y productora de uva del nordeste, destacándose como el segundo mayor centro productor de vinos finos del país y la primera región vitivinícola tropical del mundo (De Sá *et al.* 2015, Mello 2020).

En 2018 en esta región se cultivó una superficie de aproximadamente 400 ha de vid y se produjeron 4 000 000 l de vinos finos, de los cuales el 70 % (2 800 000 l) corresponde a vinos espumantes, el 29 %, a vinos tintos jóvenes, de crianza, secos y suaves y el 1 %, a vinos blancos jóvenes, secos y suaves (Leão *et al.* 2021).

En actividades vitivinícolas se emplea directa o indirectamente a unas 6000 personas, cifra que se eleva a 30 000, si se incluye la producción de uva de mesa. En la región actualmente operan nueve empresas vinícolas, con una producción anual de 8 000 000 l de vinos, lo que convierte a la región del submedio en el segundo polo vitivinícola más grande del país (Cohim 2017).

En cuanto a la producción de jugo de uva, Brasil es esencialmente un exportador del producto, con 1690 t de jugo concentrado exportadas en 2019, lo que representó un aumento del 30.30 % con respecto al año anterior (Mello 2020). En la RIDE se han instalado 11 empresas productoras de jugo de uva integral y una de jugo concentrado, que en conjunto producen 2 000 000 l/año. La evolución de la producción de jugo de uva integral se puede observar en la ilustración 35 (Silva y Lima 2021).

Ilustración 35. Evolución de la producción de jugo de uva en el valle del submedio San Francisco



Fuente: Tomado de Silvia y Lima 2021: 8.

2.5.5 Principales residuos generados en el procesamiento de acerola y uva

Dada la intensa actividad agrícola, Brasil también es uno de los países que más residuos agroindustriales produce (Cataneo *et al.* 2008), y en la agroindustria frutícola se da la misma tendencia. En la producción de jugos y pulpas de frutas se estima que se genera del 30 % al 40 % del volumen de residuos, constituidos principalmente por frutos de descarte, cáscaras, semillas, carozos y bagazo (Martins y Farias 2002).

Considerando las frutas que se destacan en el procesamiento agroindustrial en la región frutícola de la RIDE Polo Petrolina/Juazeiro, a continuación se presentan los residuos generados por el procesamiento de acerola y uva, en función de las agroindustrias asociadas a tales frutos.

2.5.5.1 Acerola

Brasil se destaca por ser el mayor productor, consumidor y exportador mundial de acerola. Pernambuco y Petronila representan el 15.42 % y el 71.29 %, respectivamente, de la producción (IBGE 2019).

El proceso de industrialización de acerola verde y madura para la producción de jugos, pulpas y concentrados genera toneladas de residuos, como semillas y bagazo (Rezende *et al.* 2018), así como residuos líquidos (ilustración 36) de carácter orgánico; sin embargo, los datos cuantitativos sobre la industrialización de la fruta y sus derivados aún son escasos.

Ilustración 36. Efluente de ultrafiltración del procesamiento de acerola



92

Se estima que aproximadamente entre el 13 % y el 40 % del volumen de la producción se convierte en residuos, que en gran parte constan de aguas residuales, semillas, pulpa macerada y frutos de descarte. Dado que la acerola puede producir hasta seis cosechas al año, ocurre una generación considerable de residuos predominantemente orgánicos (Pereira *et al.* 2009, Almeida *et al.* 2014).

Los residuos sólidos como el bagazo y los efluentes del procesamiento de la acerola tienen una alta carga orgánica y, en consecuencia, un potencial contaminante, si se desechan en el medio ambiente sin un tratamiento previo. En la tabla 6 se presenta la composición de los residuos de la extracción de pulpa de acerola.

Tabla 6. Composición de los residuos del procesamiento de la acerola

Composición	Bagazo	
	Maia <i>et al.</i> (2015)	Menezes <i>et al.</i> (2017)
Materia orgánica (materia seca)	962.5 g/kg	970.7 g/kg
	Efluentes	
	Montefusco <i>et al.</i> (2018)	André <i>et al.</i> (2020)
DQO	30 g O ₂ . L ⁻¹	129 g O ₂ . L ⁻¹
DBO	--	34 g O ₂ . L ⁻¹

2.5.5.2 Vitivinicultura

El procesamiento de la uva para la elaboración de vino y jugo genera subproductos o residuos orgánicos sólidos (ilustración 37), como orujo (ilustraciones 38 y 39 a), semillas y hollejos (ilustración 39 b) y semillas o raspones (parte de la estructura del racimo de uva que sostiene el fruto) (ilustración 40), lías, suelos de filtración y clarificación, además de residuos líquidos o efluentes vitivinícolas (Pirra 2005).

Ilustración 37. Residuos sólidos del procesamiento de la uva



El orujo de uva consta de piel, pulpa y semillas generadas después del prensado para extraer el jugo de uva (Achkar *et al.* 2016). Es un material lignocelulósico complejo y uno de los residuos vinícolas más abundantes, producidos tras el proceso de prensado (Devesa-Rey *et al.* 2011). Dichos residuos son más susceptibles a la biodegradación y presentan un buen rendimiento en la conversión de biogás. La acción de los microorganismos en la degradación está aliada a la fracción orgánica presente en el residuo, comúnmente representada por sólidos totales volátiles adicionados (Amorim *et al.* 2021b).

Ilustración 38. Orujo de uva sin semillas



Ilustración 39. Orujo que contiene semillas (a) y tallos (b)

Los residuos líquidos o efluentes vitivinícolas comprenden los líquidos provenientes del lavado de la uva (ilustración 40) y de las instalaciones vitivinícolas como bodegas, tanques, pisos y equipos (Zhang *et al.* 2017, Montalvo *et al.* 2020).

Ilustración 40. Lavado de la uva (a) y efluente resultante del lavado de la uva (b)

La variación en la cantidad de residuos vinícolas, así como en sus cargas orgánicas, depende de los procesos utilizados en la producción de vino y jugo (vendimia, trasiego, embotellado) y de las tecnologías adoptadas en el procesamiento de la uva (Rodrigues *et al.* 2006).

Se estima que, luego del procesamiento en las industrias vinícolas, se desecha alrededor del 13 % del peso total de la uva (Renaud y De Lorgeril 1992, Torres *et al.* 2002), constituyéndose el orujo en la mayor parte de los residuos sólidos generados. Datos de la industria muestran que por cada 100 l de vino producidos se generan 31.7 kg de residuos, de los cuales 20 kg son orujo y raspones o escobajos (Campos 2005) y 7 kg, lías de vino (Santos y Leite 2020). Bustamante *et al.* (2007) y Oliveira y Duarte (2016) calcularon la generación de 0.18 kg de bagazo y raspón y de 0.044 kg de lías por cada litro de vino producido.

El valor de la cuantificación de efluentes líquidos es variable, ya que depende de las dimensiones y las tecnologías aplicadas; no obstante, Da Ros *et al.* (2017), con base en una revisión sobre aguas residuales vinícolas en varios países, mencionan que la cantidad típica de efluentes generados por cada litro de vino producido es de 2 a 6 l.

En la tabla 7 se resumen los estudios de la cantidad de residuos sólidos y efluentes líquidos generados en las instalaciones de producción vinícola por cada litro de vino producido. También se muestran los residuos generados anualmente en las instalaciones vinícolas ubicadas en la RIDE Polo Petrolina/Juazeiro para 2021. Se observa que en ellas se generan cada año más de 3000 t de residuos sólidos en forma de orujo, raspones y lías, así como alrededor de 25 500 m³ de efluentes.

Tabla 7. Cuantificación de la generación de los residuos vinícolas

Referencia	Residuo sólido (kg/l de vino y/o jugo)		
	Orujo	Raspones	Lías de vino
Santos y Leite (2020)	0.150	0.035	0.07
Oliveira y Duarte (2016)	0.135	0.030	0.044
Da Ros et al. (2017)	0.180	0.040	0.060
Silva (2020)	0.140	0.035	0.104
Bustamente et al. (2007)	0.018		0.044
	kg/año		
RIDE Petrolina/Juazeiro (Lima 2021)	1 815 112.5	423 526.25	902 200
	Efluentes vinícolas (L/L de vino)		
Da Ros et al. (2017)	2-6		
Rodrigues et al. (2006)	2.4		
	m³/año		
RIDE Petrolina/Juazeiro (Lima 2021)	25 480		

La composición de los residuos frutícolas está en función de peculiaridades como el proceso de origen, la variedad de la fruta y el tipo de operación de la agroindustria, caracterizada por grandes fluctuaciones estacionales en el volumen y la composición (Bolzonella et al. 2010, Conradie et al. 2014, Bolzonella et al. 2010).

Generalmente se caracterizan por una alta carga de materia orgánica soluble (azúcares y ácidos orgánicos) y una alta biodegradabilidad (Andreottola et al. 2005), la mayoría de las veces por su inadecuada disposición (Lucas et al. 2010, Ioannou et al. 2015, Da Ros et al. 2017).

Por tanto, aunque tienen un potencial contaminante debido a dichas características, tienen un potencial energético a partir del biogás, debido a sus cargas orgánicas, por lo que son también propicios para la aplicación de tratamientos biológicos como la DA, cuyo producto es el biogás (Ioannou et al. 2014). En la tabla 8 se resumen las características cualitativas de los residuos sólidos y los efluentes vitivinícolas.

Tabla 8. Características cualitativas de los residuos sólidos y los efluentes vinícolas

Parámetro	mg/L ⁻¹	Efluentes vinícolas ¹		
		Mínimo	Máximo	Media
DQO		320	49 105	11 886
DBO		203	22 418	6570
COT		41	7363	1876
Parámetro	mg/L ⁻¹	Residuos sólidos		
DQO		190 ²	420 ²	36 300 ¹ , 280 ²
DBO		97 ²	160 ²	128 ²
COT		--	--	--

¹Orujo y ²lías.

Fuente: Elaborado con base en Pirra 2005, Ioannou *et al.* 2015 y Silva *et al.* 2020.

Por lo tanto, junto con las restricciones recientes en los estándares ambientales, los avances en la química moderna y la biotecnología y el interés industrial en la minimización de residuos, existe un interés creciente en la explotación de los residuos vitivinícolas (Navarro *et al.* 2005, Makadia *et al.* 2016), en particular mediante la DA (Ioannou *et al.* 2015, Da Ros *et al.* 2017, Silva *et al.* 2020), con el fin de valorar su potencial energético a partir de la obtención de biogás (Guerini Filho *et al.* 2018, Montalvo *et al.* 2020).

2.5.6 Potencial para la generación de biogás

La digestión anaeróbica de los subproductos del procesamiento de frutas resulta prometedora para la valorización energética de los residuos, ya que es posible utilizar el biogás como fuente de energía limpia (Da Ros *et al.* 2017). Por medio de la DA, la materia orgánica que la biomasa contiene se convierte en biogás, cuyos principales componentes son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂).

Específicamente con respecto a los residuos, Besinella *et al.* (2017) evaluaron la biodigestión de orujo y lías de vino en instalaciones vinícolas en Rio Grande do Sul en 8.4 x 10⁶ m³ de biogás por año, equivalente a la generación de cerca de 15 GWh/año⁻¹, adoptando 30 % para la conversión de biogás en energía eléctrica. Frigo *et al.* (2015) obtuvieron rendimientos de 1425.15 y 535.25 NmL CH₄ para sustratos de orujo y raspones de uva, respectivamente.

En el PLANARES (MMA 2020), donde se destaca la importancia de considerar el potencial energético de los residuos generados en la producción agrícola durante su eliminación, se estimó que en 2015 en la región Nordeste se logró generar 772 GWh de energía a través de la biodigestión de residuos agrícolas con 4 biodigestores. Además, se identificó el potencial de generación de biogás a partir del orujo de uva, que presentó un factor de generación de 40 % y 74 m³ de biogás producido por tonelada de orujo. En la tabla 10 se presenta la estimación del potencial de producción de biogás y generación de energía a partir de residuos agrosilvopastoriles por región brasileña (tabla 9).

Tabla 9. Potencial de producción de biogás y energía de la agricultura en 2015

Región	Producción de biogás (m ³ /año)	Generación de energía (GWh)
Norte	247 683 796	1462
Nordeste	808 514 128	4773
Centro-Oeste	1 970 507 372	11 633
Sureste	4 862 383 719	28 705
Sur	1 350 283 891	7971
Brasil	9 239 372 906	54 544

Fuente: Elaborado con base en IBRAM 2016

2.5.7 Potencial de generación de biogás en la RIDE a partir de los residuos derivados de la vitivinicultura y de la industrialización de la acerola

Para estimar el potencial de generación de biogás a partir de la DA se utilizaron los resultados obtenidos mediante trabajos realizados por el Grupo de Investigación en Saneamiento Ambiental en los Medios Rural y Urbano en el Valle de San Francisco de la Universidad Federal del Valle de San Francisco (UNIVASF), el cual lleva a cabo investigaciones y estudios junto con empresas procesadoras de uva y acerola, así como trabajos de investigación bibliográfica. Seguidamente se detallan las etapas del procedimiento:

Primera etapa. *Cuantificación de residuos.* Primero se estimó la generación de residuos en el procesamiento de la acerola y en la vitivinicultura en la RIDE.

Segunda etapa. Seguidamente, en las tablas 10 y 11 se determinó el rendimiento de metano a partir de la DA de los residuos, según el volumen de metano producido por cada kg de materia orgánica (SV) contenida en los residuos (m³ CH₄/kg SV_{residuo}).

Tabla 10. Rendimientos en la vitivinicultura según diversas fuentes bibliográficas

Referencia	Metano obtenido (m ³ CH ₄ /kg SV _{residuo})			Tiempo de tratamiento (días)
	Orujo	Raspones	Lías	
Da Ros et al. (2017)	0.340	0.1333	0.370	40
Guerini Filho et al. (2018)	0.148	-	-	23
Montalvo et al. (2020)	0.170	0.115	0.416	30
Silva et al. (2020)	0.064	-	-	12
Amorim et al. (2021a)	0.349	-	-	36
	0.987			46

Tabla 11. Rendimientos de los residuos de acerola

Referencia	Metano obtenido (m ³ CH ₄ /d)	
	Orujos	Efluente
Montefusco <i>et al.</i> (2018)	----	81

Tercera etapa: La estimación de la producción de biogás se determinó (cuadro 8) con base en las pruebas de Da Ros *et al.* (2016) y de Silva *et al.* (2020) para la conversión de raspones y lías de uva y efluentes de acerola en metano. En el tabla 12 se presenta el potencial para generar biogás y metano de los residuos de la agroindustria frutícola (acerola y uva) en la RIDE Polo Petrolina (PE)/Juazeiro (BA).

Tabla 12. Potencial de metano de los residuos de la agroindustria frutícola en la RIDE Polo Petrolina (PE)/Juazeiro (BA)

Residuo	Potencial de biogás (m ³ /año)	Rendimiento de metano (%)	Potencial de metano (m ³ /año)
Efluente (procesamiento de la acerola)*	---	---	29 565
Orujos de uva	193 046.66	47	115 828.99
Raspones de uva	93 881.65	60	56 328.99
Lías	556 356.67	60	333 814
Total	843 284.98		505 971.98

Fuente: Elaborado con base en André *et al.* 2020 y Lima 2021.

2.5.8 Oportunidades para el aprovechamiento del biogás en la región semiárida

El biogás generado en la región ha contribuido principalmente a suplir la demanda de GLP y la producción de energía térmica. Además, recientemente se ha estudiado la posibilidad de inyectar metano a la red eléctrica para la cogeneración de energía (Cassini 2003, ICLEI 2010, Chernicharo *et al.* 2016, Pereira *et al.* 2009). Todas estas alternativas conllevan beneficios económicos, sociales y ambientales para las comunidades y agroindustrias.

En cuanto a los aspectos ambientales, cabe mencionar la reducción de las emisiones de GEI (Cassini 2003), así como la sustitución de los recursos naturales usados como fuentes de energía térmica (Frigo *et al.* 2015), reemplazando y complementando el uso de otras fuentes de energía térmica, como la leña y el GLP.

En relación con el uso del biogás para cocinar, muchas familias ya han venido implementando esta práctica, por ser una alternativa más promisoría. Estas no necesitan fragmentar sus bosques para contar con leña, ni dañar su salud al respirar el humo y las cenizas derivados de su quema. Tampoco requieren recursos financieros para comprar GLP, que suele ser muy costoso, por lo que esta resulta una estrategia viable y económica (Amorim *et al.* 2021a, Silva *et al.* 2021, Amorim *et al.* 2021b) de hecho, las familias que producen biogás son capaces de generar su propia energía para sus hogares y propiedades.

El biogás generado también puede utilizarse como fuente de energía alternativa para la propia agroindustria. Según un estudio de Torres (2002), la DA de los residuos vitivinícolas es capaz de suplir hasta el 86 % del consumo eléctrico anual de una instalación vinícola pequeña, con energía suficiente para responder a los requerimientos térmicos de los sistemas de aire acondicionado y calentamiento del agua y del propio biodigestor.

Según estudios sobre el uso potencial del biogás realizados por Besinella *et al.* (2017) en instalaciones vinícolas de Rio Grande do Sul, se generaron $8.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ de biogás al año, equivalente a unos 15 GWh/año^{-1} , adoptándose el 30 % para la conversión de biogás en energía eléctrica. Para esta conversión, Lima (2021) adoptó un rendimiento del 40 % en su estudio, con base en Abdeshahian *et al.* (2016), y obtuvo el pronóstico de energía eléctrica a partir de la producción potencial de biogás estimada en 2 025 240.76 kWh/año.

El estudio de Lima (2021) complementa los datos del Ministerio del Medio Ambiente (MME) (2020), en el sentido de que el consumo residencial promedio de energía eléctrica en la región Nordeste es de 125.7 kWh/mes, por lo que la producción de energía estimada en este estudio tiene el potencial para abastecer alrededor de 1342 viviendas por mes.

2.5.9 Principales barreras para la adopción de la biodigestión y el aprovechamiento del biogás

En 2016 el Ministerio de las Ciudades elaboró un diagnóstico en el marco del Proyecto Brasil-Alemania para la Promoción del Aprovechamiento Energético del Biogás en Brasil por medio de la Secretaría Nacional de Saneamiento Ambiental (Secretaría Nacional de Saneamiento Ambiental y Probiogás 2016).

A través de entrevistas a los actores del sector, se identificaron cuatro barreras:

1. Resulta difícil determinar la relación entre el costo del proyecto y su beneficio comercial.
2. El número de proyectos exitosos de referencia a escala comercial-industrial es reducido.
3. Se enfrentan dificultades para acceder a información técnica, comercial y legal.
4. Se carece de políticas específicas relacionadas con el biogás.

Desde entonces, se han notado cambios en el sector. De acuerdo con datos de la Asociación Brasileña de Biogás (ABILOGÁS), el sector de biogás y biometano se encuentra en un proceso de expansión, mientras que el **mercado potencial se proyecta en 120 800 000 m³/día de biogás**. En 2020 la ABILOGÁS identificó la instalación de 69 nuevas plantas de biogás en el país, la mayoría de las cuales estaba destinada a la micro y la minigeneración. La mitad se encontraba en predios rurales y el 84 % generaba electricidad.

- Los sectores que presentan un mayor potencial de producción son el de los residuos sucroenergéticos (48 %), el de los residuos agroindustriales (45 %) y el de saneamiento (7 %).

La mayor parte de los casos exitosos han tenido lugar en las regiones Sur y Sureste. En la región Nordeste, las iniciativas aún son aisladas.

Los pocos estudios efectuados a gran escala que demuestran la eficiencia del proceso de obtención de biogás a partir de residuos agroindustriales es una de las razones de la carencia de iniciativas. Se observa que, si bien algunos pequeños productores han instalado biodigestores en la región del semiárido, lamentablemente muchos de ellos han sido abandonados debido a:

- La falta de experiencia de las personas que han implementado la tecnología;
- Escasas capacitación y asistencia técnica dirigidas a las familias que cuentan con este sistema; y
- Problemas en el dimensionamiento y el uso de materiales inadecuados.

Esto demuestra la necesidad de realizar más estudios a escalas reales de aprovechamiento, ya que muchos se han llevado a cabo solo a escala de laboratorio.

Otra dificultad es el costo del sistema. Dada la ausencia de experiencias con esta tecnología en el mercado brasileño, existe incertidumbre al respecto, lo que hace que la implementación de la tecnología resulte en altos costos de inversión que dificultan su difusión en más localidades de todo Brasil.

En general, se percibe que en el sector productivo frutícola de la RIDE Petrolina/Juazeiro aún no hay conciencia sobre el valor de los residuos para la generación de energía, ni se percibe en la DA una forma de inversión en el largo plazo, ya que, de todas maneras, para que la agroindustria funcione, esta debe invertir en evitar la contaminación que sus residuos pudieran generar. Todavía hay pocos estudios y encuestas acerca de la cantidad de residuos. Los escasos estudios y encuestas se enfocan poco en los residuos de los procesos agroindustriales, limitándose a temas de defensa agrícola, como el enfoque de Távora y Cavalcanti (2017), en que se subestima el sector al afirmar:

El residuo sólido proveniente de la vinificación vuelve a ser utilizado en los campos de labranza y/o catinga. En el caso de los efluentes del proceso de vinificación, el volumen es bajo. Actualmente se aplica en la labranza. Muchas empresas, con el apoyo del SENAI, tienen un proyecto en marcha para un tratamiento adecuado.

También se ha venido avanzando en el tema de las dificultades asociadas a las políticas públicas. En abril de 2021 el Gobierno Federal brasileño promulgó la Ley n.º 14 134/21, denominada Ley del Gas Natural. En su texto, el biometano se clasifica como compatible con el gas natural y pasa a estar sujeto a las normas fijadas por la Agencia Nacional del Petróleo (ANP), lo que debería facilitar y acelerar los proyectos de aprovechamiento del biogás y ayudar a los modelos de negocio.

2.5.10 Experiencias con la agroindustria de la acerola y la vitivinicultura locales

Desde 2013 el Grupo de Investigación en Saneamiento Ambiental en los Medios Rural y Urbano en el Valle de San Francisco de la UNIVASF ha venido realizando, junto con empresas dedicadas al procesamiento de frutas, investigaciones y estudios sobre la obtención de biogás y biometano a partir de residuos de frutas.

Uno de los primeros estudios fue el realizado por Montefusco *et al.* (2018) con residuos del procesamiento de la acerola. Los autores estimaron que, mediante la aplicación de un tratamiento anaerobio al efluente líquido del proceso de ultrafiltración, se generaron alrededor de $81.09 \text{ m}^3/\text{d}^{-1}$ de metano.

Posteriormente, se realizaron dos estudios con el efluente de acerola verde para evaluar el potencial de producción de metano, cuyos resultados fueron exitosos. Andre *et al.* (2019) concluyeron que todos los tratamientos aplicados en la biodegradación fueron potencialmente promisorios para la obtención de metano, lográndose una tasa y producción de 0.102 l de CH_4 por cada gramo de materia orgánica removida del efluente. Resultados similares fueron confirmados por André *et al.* (2020), quienes aplicaron diferentes cargas de demanda química de oxígeno (DQO) por litro de biodigestor ($0.86 \text{ g DQO}_{\text{Apl}}^{-1}\text{R}$, $1.5 \text{ g DQO}_{\text{Apl}}^{-1}\text{R}$ y $2 \text{ g DQO}_{\text{Apl}}^{-1}\text{R}$) y demostraron la viabilidad de la obtención de metano a partir de dichos residuos, recomendando su aplicación a nivel piloto.

En el caso de los residuos vitivinícolas, el grupo de investigación de la UNIVASF ha venido realizando estudios sobre efluentes líquidos y residuos sólidos (orujo de uva). Por medio de un estudio realizado con efluentes de una instalación vinícola ubicada en Petrolina, Amorim *et al.* (2021b) determinaron que dichos residuos tienen una alta fracción orgánica, que oscila entre el 85 % y el 94 %, lo que evidencia su susceptibilidad al tratamiento biológico para la obtención de biogás.

Estudios de Silva *et al.* (2020) y Amorim *et al.* (2021b), en los que se utilizó orujo de uva de los cultivares híbridos Isabel y BRS Violeta y raspones, semillas y orujo de una instalación vinícola ubicada en Petrolina-PE, fueron significativos para evaluar el potencial de biodegradación de los residuos en la RIDE para obtener energía. Los resultados experimentales mostraron el potencial del orujo de uva para su aplicación en la DA, habiéndose obtenido la producción de 64.22 l de metano por cada kg de sólidos orgánicos contenidos en el orujo.

Al evaluar la eficiencia de la DA seca del residuo de uva a partir de la digestión, observaron la eficiencia del proceso, tanto para la reducción de la materia orgánica del residuo, como para la producción de metano.

La reducción de sólidos demostró ser eficaz, con valores superiores al 80 % de reducción. Luego de finalizada la degradación, el residuo compuesto por raspones, semillas y orujo presentó un volumen de metano acumulado de 580.62 Nm , mientras que solo el orujo produjo 205.07 Nm L. La producción de metano fue mayor en el caso de residuos con compuestos lignocelulósicos, lo que indica que la composición del residuo que presenta estas estructuras promueve un mejor desempeño de los microorganismos para la conversión de materia orgánica en metano.

Ante los prometedores resultados de la producción de biogás a partir de residuos de frutas, se esperan mayores incentivos y políticas públicas para la implementación de biodigestores, ya sea en las propias agroindustrias o en las fincas de los pequeños productores, para su autoconsumo o distribución. Tales acciones conducirían a impactos ambientales y sociales positivos. Además, completarían la cadena frutícola en la región, dado que la fruticultura es un sector que genera más de cinco millones de empleos y se destaca como un sector incluyente, pues la mayoría de las vacantes se destinan a mujeres (ABRAFRUTAS 2021).

2.5.11 Referencias bibliográficas

- Abdeshahian, P.; Lim, J.SH.; HO, W.SH.; HASHIM, H.; LEE, CH.T. 2016. Potencial of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renew Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v.60, pp. 714-723.
- ABDI (Agencia Brasileña de Desarrollo Industrial). 2008. Relatório de acompanhamento setorial de frutas processadas: volume I. (en línea). Consultado 30 nov. 2022. Disponible en https://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/RelatorioABDI/frutas-processadas_vol-I_julho2008.pdf.
- ABRAFRUTAS (Asociación Brasileña de Productores y Exportadores de Frutas e Derivados). 2019. Produção das principais frutas estabiliza em 43 milhões de toneladas. (en línea). Consultado 24 jan. 2023. Disponible en <https://abrafrutas.org/2020/04/9665/#:~:text=0%20Brasil%20continua%20como%20o,dir%20da%20Abrafrutas%2C%20Eduardo%20Brand%C3%A3o>.
- ABRAFRUTAS (Asociación Brasileña de Productores y Exportadores de Frutas y Derivados). 2021. Abrafrutas participa do 6° CNMA e aborda a alta empregabilidade da mulher na fruticultura (en línea). Consultado 24 ene. 2023. Disponible en <https://abrafrutas.org/2021/10/mulheres-fruticultura/>.
- Achkar, JH; Lendormi, T; Hobaika, Z; Salameh, D; Louka, N; Maroun, RG; Lanoisellé, JL. 2016. Anaerobic digestion of grape pomace: biochemical characterization of the fractions and methane production in batch and continuous digesters. *Waste Management* 50:275-282.
- Almeida, JS; Santos Neto, LD; Paiva, KSL; Zaiden, RT; Silveira Neto, OJ; Bueno, CP. 2014. Use of by-products of fruit in animal feed. *Revista Eletrônica Nutritime* 11(3):3430-3443.
- Amorim, MCC; De Oliveira, AFG; Nascimento, ACS; Silva, PTS; Pereira, EC. 2021a. Caracterização e tratabilidade de efluente vinícola no Vale do São Francisco, Brasil (en línea). Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (19, 2021, Recife, Brasil). Brasil, ABES. Consultado 16 sep. 2022. Disponible en <http://abes-dn.org.br/abeseventos/19silubesa/>.
- Amorim, MCC; Galvão, RS; Gonçalves, YBO; Silva, KCD. 2021b. Digestão anaeróbia seca e produção de metano de resíduo vinícola (en línea). Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (19, 2021, Recife, Brasil). Brasil, ABES. Consultado 16 sep. 2021. Disponible en <http://abes-dn.org.br/abeseventos/19silubesa/>.

- ANDRADE, P.F.S. FRUTICULTURA. 2020 Análise da Conjuntura. Departamento de Economia Rural – DERAL. PROGNÓSTICO. Acesso em 26 Jan, 2023. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-01/fruticultura_2020.pdf
- André, ACL; Amorim, MCC; Silva, KCD; Silva, PTS. 2020. Biochemical potential of methane of wastewater ultrafiltration in the processing of unripened green acerola (*Malpighia emarginata*). Ciências Exatas e Tecnológicas 41(2):135-144.
- André, A. C. L.; Silva, R. T.; Silva, K. C. D.; Silva, P. T. S.; Amorim, M. C. C. 2019. Biodegradabilidade anaeróbica de efluente do processamento da acerola verde. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologías Ambientais, Salvador, v. 7, n. 1, p. 26-36, DOI: 10.9771/gesta.v7i1.28070. Consultado de 30 de ene. Disponible en <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/28070>
- Andreottola, G.; Oliveira, E.L.; Foladori, A.; Dallago, L.; Peterlini, R.; Cadonna, M. (2005). Método respirométrico para monitoramento de processos biológicos. Engenharia Sanitária e Ambiental, 10(1), p.14-23. Disponíbele en <https://www.scielo.br/j/esa/a/j3R376DR4L4TWt77GMdSKXy/?lang=pt>
- Barros, ESC. 2017. Remoção de carga orgânica do efluente da agroindústria da acerola (*Malpighia emarginata* DC.). Trabajo de conclusión de curso Ing. Bahia, Brasil, UNIVASF. 60 p.
- Besinella, G. B., Ribeiro, C.B., Gueri, M.V.D., Buratto, W.G., Steffler, V., Veroneze, M.L. 2017. Potencial dos subprodutos vinícolas da região sul do Brasil para a geração de biogás e energia elétrica. Edição Especial: II Seminário de Engenharia de Energia na Agricultura. Acta Iguazu, v. 6, n. 5, p. 253-261.
- Birolo, F; Zanela, V. 2017. Vinhos tropicais: um desafio à tradição. XXI Ciência para a Vida 16.
- Bolzonella, D; Fatone, F; Pavan, P; Cecchi, F. 2010. Application of a membrane bioreactor for winery wastewater treatment. Water Science and Technology 62(12):2754-2759.
- Bustamante, MA; Paredes, C; Moral, R; Moreno-Caselles, J; Pérez-Murcia, MD; Pérez- Espinosa A, et al. 2007. Co-compostagem de resíduos de destilaria e vinícola com lodo de esgoto. Water Science and Technology 56:187-92.
- Campos, LMAS. 2005. Obtenção de extratos de bagaço de uva cabernet sauvignon (*Vitis vinifera*): parâmetros de processo e modelagem matemática. Tesis Mgtr. Florianópolis, Brasil, UFSC.
- Cassini, ST (coord.). 2003. Digestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Rio de Janeiro, Brasil, Vitória. 1 ed. 210 p.
- Cataneo, CB; Caliar, V; Gonzaga, LV; Kuskoski, EM; Fett, R. 2008. Atividade antioxidante e conteúdo fenólico do resíduo agroindustrial da produção de vinho. Ciências Agrárias 29(1):93-102.
- Chernicharo, CAL. 2016. Reatores anaeróbios. 2 ed. ampl. y act. Belo Horizonte, Brasil, UFMG. v. 5, 379 p.

- CODEVASF. 2021. Projetos de irrigação da Codevasf produziram mais de 4,3 milhões de toneladas de itens agrícolas em 2020. [S. l.], 15 mar. 2021. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/noticias/2021/projetos-de-irrigacao-da-codevasf-produziram-mais-de-4-3-milhoes-de-toneladas-de-itens-agricolas-em-2020>. Acesso em: 22 out. 2022
- Cohim, X. 2017. A importancia da fruticultura para o Vale. IX Workshop Rio São Francisco: cultura, identidade e desenvolvimento. Rio São Francisco 2030 água e uso sustentável.
- Conradie, A; Sigge, GO; Cloete, TE. 2014. Influence of winemaking practices on the characteristics of winery wastewater and water usage of wineries. *South African Journal of Enology and Viticulture* 35(1):10-19.
- Corcino, CO; Teles, RBA; Almeida, JRGS; Lirani, LS; Araújo, CRM; Gonsalves, AA; Maia, GLA. 2019. Avaliação do efeito do uso de agrotóxicos sobre a saúde de trabalhadores rurais da fruticultura irrigada. *Ciência & Saúde Coletiva* 24(8):3117-3128.
- Cunha, A. M. (2008) (coord.). Relatório de Acompanhamento Setorial (Volume I): Frutas processadas. Projeto: Boletim de Conjuntura Industrial, Acompanhamento Setorial e Panorama da Indústria. Convênio: ABDI e NEIT/IE/UNICAMP. Campinas/SP: Julho de 2008
- Da Ros, C.; Cavinato, C.; Pavan, P.; Bolzonella, D. 2017. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and wine lees: An integrated approach for sustainable wine production. *Journal of Environmental Management*, v. 203, pág. 745–752.
- Da Silva, JS. Estudo de estatísticas de produção e levantamento do potencial de IG do suco uva integral do Vale do Submédio São Francisco (en línea). 2021. Consultado 4 nov. 2022. Disponible en <https://portais.univasf.edu.br/profnit/profnit/Estudoestatsticadovsf.pdf>.
- Da Silva, KCD; Silva, PTS; Barros, ESC; Gonçalves, YBO; Galvão, RS; Amorim, M. 2020. Effect of the inoculum/substrate ratio on the biochemical methane potential (BMP) of grape marc. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 15(5).
- Da Silva, SPR; Palha, MAPF. 2016. Inventário da biomassa produtora de biogás de Pernambuco / Sérgio Peres Ramos da Silva, Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha Recife: Gráca & Copiadora Nacional.
- De Sá, NC; Silva, EMS; Bandeira, AS. 2015. A cultura da uva e do vinho no Vale do São Francisco. *Revista de Desenvolvimento Econômico* XVII:461-491.
- Devesa-Rey, R; Vecino, X; Varela-Alende, JL; Barral, MT; Cruz, JM; Moldes, AB. 2011. Valorization of winery waste vs. the cost of not recycling. *Waste Manage* 31:2327-2335.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Investigación Agropecuaria). 2012. A cultura da acerola. Brasília, Brasil. 144 p. (Coleção Plantar, v. 69).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2019. FAOSTAT (en línea). Consultado 8 dic. 2022. Disponible en <https://www.fao.org/faostat/es/#home>.

- Ferreira, LA; Silva, DP; Soares, DR; Scheidt, GN. 2017. A utilização de resíduos das agroindústrias de suco de abacaxi para a produção de bromelina. *Revista Sítio Novo* 1:247-257.
- FIEP (Federación de Industrias del Estado de Paraná, Brasil). 2021. Indústria do Paraná avança em projetos de transformação de resíduos em biogás (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://agenciafiep.com.br/2021/05/19/industria-do-parana-avanca-em-projetos-de-transformacao-de-residuos-em-biogas/>.
- Guerini Filho, M.; Lumi, M.; Hasan, C.; Marder, M.; Leite, L.C.S.; Konrad, O. Energy Recovery From Wine Sector Wastes: A Study About The Biogas Generation Potential In A Vineyard From Rio Grande Do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, V. 29, Pag. 44-49, 2018.
- Filter, CF; Beling, RR (eds.). 2017. Anuário brasileiro da uva 2018 (en línea). Santa Cruz do Sul, Brasil, Gazeta. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.editoragazeta.com.br/sitewp/wp-content/uploads/2018/10/UVA-E-VINHO_2018_DUPLA.pdf.
- Friego, K. D. A.; Feiden, A.; Galant, N. B.; Santos, R. F.; Mari, A. G.; Friego, E.P. 2015. Biodigestores: seus modelos e aplicações. *Revista Acta Iguazu*, v.4, n.1, p. 57- 65, 2015. Disponible en <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/12528/8708>
- Furlaneto, FPB; Nasser, MD. 2015. Panorama da cultura da acerola no estado de São Paulo. *Pesquisa & Tecnologia* 12(1).
- Godoy, RCB; Matos, ELS; Amorim, TS; Neto, MAS; Ritzinger, R; Waszczynsky, N. 2008. Avaliação de genótipos e variedades de acerola para consumo in natura e para elaboração de doces. *Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos* 26(2):197-204.
- Guerini Filho, M; Lumi, M; Hasan, C; Marder, M; Leite, LCS; Konrad, O. 2018. Energy recovery from wine sector wastes: a study about the biogas generation potential in a vineyard from Rio Grande do Sul, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 29:44-49.
- IBAMA (Instituto Brasileiro de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables). Instrução normativa IBAMA nº 13, 2012 (en línea). Brasil. 18 dic. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=248656>.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística). 2019. Censo agropecuário 2017: resultados definitivos (en línea). Rio de Janeiro, Brasil. Consultado 12 oct. 2021. Disponible en https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_resultados_definitivos.pdf.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística). 2020. Levantamento sistemático da produção agrícola (en línea). Consultado 6 dic. 2021. Disponible en <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>.
- IBRAM (Instituto Brasileiro de Minería). 2016. Gestão e manejo de rejeitos da mineração. Brasília, Brasil. 127 p.

- ICLEI (Governos Locais pela Sustentabilidade, Brasil). 2010. Manual para aproveitamento de biogás: volume 2, efluentes urbanos. São Paulo, Brasil, Escritório de projetos no Brasil.
- Ioannou, L; Michael, C; Kyriakou, S; Fatta-Kassinos, D. 2014. Solar Fenton: from pilot to industrial scale application for polishing winery wastewater pretreated by MBR, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 89(7):1067-1076.
- Ioannou, LA; Li Puma, G; Fatta-Kassinos, D. 2015. Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: a review. *Journal of Hazardous Materials* 286:343-368.
- Israel, MC. 2005. Utilização do resíduo do processamento do palmito para a produção de enzimas hidrolíticas por fungos do gênero *Polyporus*. Tesis Mgtr. Blumenau, Brasil, FURB.
- Kist, BB; Carvalho, C; Beling, RR. 2021. Anuário brasileiro de horti e fruti 2021 (en línea). Santa Cruz, Brasil, Gazeta. Consultado 2 dic. 2021. Disponible en https://www.editoragazeta.com.br/sitewp/wpcontent/uploads/2021/04/HORTIFRUTI_2021.pdf.
- Leão, ELS; Moutinho, LMG. 2014. O arranjo produtivo local de floricultura irrigada do Vale do Submédio do São Francisco como objeto de política. *Revista de Administração, Contabilidade e Economia* 13(3):829-858.
- Leão, PCS; Marques, ATB; Barros, APA. 2021. Cultivares de videira para a elaboração de vinhos finos para o Submédio do Vale do São Francisco: circular técnica 128 (en línea). Brasil, EMBRAPA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134100/1/Cultivares-de-videira-CT-128-2021.pdf>.
- Lima, CCC. 2021. Caracterização dos resíduos de viticultura da ride polo Petrolina(PE)/Juazeiro(BA) e possíveis alternativas de uso. Trabajo de conclusión de curso Ing. Bahia, Brasil, UFVFSF. 68 p.
- Lousada Júnior, J. E.; Costa, J. M. C.; Neiva, J. N. M.; Rodriguez, N. M. 2006. Caracterização físico-química de subprodutos obtidos do processamento de frutas tropicais visando seu aproveitamento na alimentação animal. *Revista Ciência Agronômica*, v. 37, n. 1, p. 70 -76.. Disponible em <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=195317425013>
- Lucas, MS; Peres, JA; Li Puma, G. 2010. Treatment of winery wastewater by ozone based advanced oxidation processes (O_3 , O_3/UV and $O_3/UV/H_2O_2$) in a pilot scale bubble column reactor and process economics. *Separation Purification Technology* 72:235-241.
- Maia, ISAS; Braga, AP; Gerra, DGF; Lima Júnior, DM. 2015. Valor nutritivo de silagens de capim elefante com níveis crescentes de resíduo da agroindústria da acerola. *Acta Veterinaria Brasílica* 9(2):190-194.
- Makadia, TH; Shahsavari, E; Adetutu, EM; Sheppard, PJ; Ball, AS. 2016. Effect of anaerobic co-digestion of grape marc and winery wastewater on energy production. *Australian Journal of Crop Science* 10:57-61.

- Martins, C.R.; Farias, R.M. 2002 Produção de alimentos x desperdício: tipos, causas e como reduzir perdas na produção agrícola. Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia, v.9, n.1, p.83-93..
- Mello, LMR. 2020. Vitivinicultura brasileira: panorama 2019 (en línea). Bento Gonçalves, Brasil, EMBRAPA. Consultado 5 dic. 2021. Disponible en <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1124189/1/COMUNICA-DO-TECNICO-214-Publica-602-versao-2020-08-14.pdf>.
- Mello, LMR; Machado, CAE. 2021. Vitivinicultura brasileira: panorama 2020 (en línea). Bento Gonçalves, Brasil, EMBRAPA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/227610/1/ComTec-223-21.pdf>.
- Menezes, OC; Bagaldo, AR; Correia, BR; Carvalho, VMD; Mazza, PHS; Silva, FL; Alves, IS; Hora, DIC. 2017. Composição bromatológica e degradabilidade de resíduos da acerola resultantes do processamento de sucos e polpas de frutas. Congresso Brasileiro de Zootecnia-Zootec 2017 (27, 2017, São Paulo, Brasil).
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente, Brasil). 2020. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://smastr16.blob.core.windows.net/conesan/sites/253/2020/11/pnrs_2020.pdf.
- Montalvo, S; Martineza, J; Castilloa, A; Huiliñira, C; Borjab, R; Garcíac, V; Salazar, R. 2020. Sustainable energy for a winery through biogas production and its utilization: a Chilean case study. Sustainable Energy Technologies and Assessments 37.
- Montefusco, N; Barros, E; Mattos, R; Silva, W; Amorim, M. 2018. Caracterização e potencial geração de metano por efluente da agroindústria da acerola. Gestão Integrada de Resíduos 3:122-125.
- Nascimento Filho, WB; Franco, CR. 2015. Avaliação do potencial dos resíduos produzidos através do processamento agroindustrial no Brasil. Revista Virtual de Química 7(6):1978-1987.
- Navarro, P.; Sarasa, J.; Sierra, D.; Esteban, S.; Ovelleiro, J.L. 2005. Degradation of wine industry wastewaters by photocatalytic advanced oxidation. Water Sci. Technol. v. 51, p. 113–120.
- Niagro Nichirei do Brasil Ag. Ltda. 2021. Mission (en línea). Consultado 8 dic. 2021. Disponible en <http://www.niagro.com.br/export/mission.html>.
- OIV (Organización Internacional de la Viña y el Vino, Francia). 2019 statistical report on world vitiviniculture (en línea). París. Consultado 3 de noviembre de 2022.. Disponible en <https://www.oiv.int/public/medias/6782/oiv-2019-statistical-report-on-world-vitiviniculture.pdf>.
- Oliveira M; Duarte, E. 2016. Abordagem integrada dos resíduos da vinícola: geração de resíduos e consolidação de dados. Frontiers of Environmental Science and Engineering 10(1):168-176.
- Pereira, LGR; Azevedo, JAG; Pina, DS; Brandão, LGN; Araújo, GGL; Voltolini, TV. 2009. Aproveitamento dos coprodutos da agroindústria processadora de suco e polpa de frutas para alimentação de ruminantes. Brasília, Brasil, EMBRAPA. 30 p.

- Pirra, A. J. 2005. Caracterização e tratamento de efluentes vinícolas da Região Demarca de Douro. Tese (Doutorado)- Departamento de Fitotecnia e Engenharia Rural, Universidade de Trás-dos Montes e Alto Douro, Vila Real, 356.
- Política Nacional de Resíduos Sólidos-Lei n.º 12 305 (en línea). Diário Oficial da União. Brasil. 2 ago. 2010. Consultado. Disponible en https://sedurb.es.gov.br/Media/sedurb/PDF/Lei_12305.pdf.
- Portaria n.º 80, 2018 (en línea). Diário Oficial da União. Brasil. 28 feb. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-80-de-28-de-fevereiro-de-2018-4913581>.
- Renaud, S.; De Lorgeril, M. Wine, alcohol, platelets, and the French paradox for coronary heart disease. *The Lancet*, London, v. 339, n. 8808, p. 15231526, 1992.
- Rezende, YRR; Nogueira, JP; Narain, N. 2018. Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: chemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry* 254:281-291.
- Righi, E; Variani, C; Bitencourt, BM. 2020. Análise da produção industrial e dos resíduos em uma vinícola na Serra Gaúcha, Brasil. *Revista Brasileira Gestão Ambiental Sustentável* 7(15):319-340.
- Rodrigues, AC; Oliveira, JM; Oliveira, JA; Peixoto, J; Nogueira, R; Brito, AG. 2006. Tratamento de efluentes vitivinícolas: uma caso de estudo na região dos vinhos verdes. *Indústria e Ambiente* 40:20-25.
- Santos, PVS; Leite, AAM. 2020. Identificação de produtos secundários da vinificação: um estudo de caso. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* 9(1):650-666.
- Secretaría Nacional de Saneamiento Ambiental; Probiogá. 2016. Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil. Brasília, Brasil, Probiogás. 74 p. (Série Desenvolvimento do Mercado de Biogás, v. 4).
- Silva, K. C. D. *et al.* 2020 Effect of the inoculum/substrate ratio on the biochemical methane potential (BMP) of grape marc. **Revista Ambiente & Água**, v.15 no.5, Taubaté-SP, 2020. Disponible en <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/YmJKzdcvYP5cVrgqPdKftQv/?lang=en>
- Silva, J. S.; Lima, M. S. 2021. Estudo de Estatísticas de Produção e Levantamento do Potencial de IG do Suco Uva Integral do Vale do Submédio São Francisco. Consultado 20 de ene. Disponível em < <https://portais.univasf.edu.br/profnit/profnit/Estudoestatsticasdovsf.pdf> > Acesso em: 05 out. 2021.
- SIRGAS. 2000. Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. (en línea) Brasil, SIRGAS. Consultado 20 2 ene. Disponible en: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/sirgas/aplicativos/transformacao_coordenadas/grades_transformacao/Instru%C3%A7%C3%B5es_grids.txt
- Sobrinho, ISB. 2014. Propriedades nutricionais e funcionais de resíduos de abacaxi, acerola e cajá oriundos da indústria produtora de polpas. Disertación Mgtr. Bahia, Brasil, UESB.

- Souza, FF; Deon, MD; Castro, JMC; Calgaro, M. 2017. Contribuições das pesquisas realizadas na Embrapa Semiárido para a cultura da aceroleira (en línea). Petrolina, Brasil, Embrapa Semiárido. 28 p. (Documentos on line, v. 282). Consultado 8 dic. 2021. Disponible en: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/173370/1/SDC282.pdf>.
- Tavora, LEM; Cavalcanti, AVA. 2017. Arranjo produtivo de viticultura, vinhos e derivados em Pernambuco: plano de melhoria da competitividade. Recife, Brasil, SECTI/PE. 156 p.
- Torres, J. B.; Varela, B.; Garcia, M. T.; Carilla, J.; Matito, C.; Centelles, J. J.; Cascante, M.; Sort, X; Bobet, R. 2002 (en línea). Valorization of grape (*Vitis vinifera*) byproducts. Antioxidant and biological properties of polyphenolic fractions differing in procyanidin composition and flavonol content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Columbus, v. 50, n. 26, p. 75487555.
- Vidal, MF. 2019. Fruticultura na área de atuação do BNB: produção e mercado (en línea). Brasil, Banco do Nordeste. 11 p. (Caderno Setorial ETENE, v. 4). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/625/1/2019_CDS_84.pdf.
- Vidal, MF; Ximenes, LJF. 2016. Comportamento recente da fruticultura nordestina: área, valor da produção e comercialização (en línea). Brasil, Banco do Nordeste. 26 p. (Caderno Setorial ETENE, v. 1). Consultado 9 dic. 2021. Disponible en https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1141/1/2016_CDS_2%20Fruticultura.pdf.
- Vidal, M.F. Produção Comercial De Frutas Na Área De Atuação Do BNB. 2021 (en línea) Caderno Setorial CETENE. Ano 6, n.168. 2021. Consultado 30 de enero. Disponible en https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/822/1/2021_CDS_168.pdf línea 47 pg 2.
- Zhang, N., Hoadley, A., Patel, J., Lim, S., Li, C. 2017. Sustainable options for the utilization of solid residues from wine production. *Waste Management*. v. 60, p.173–183.

2.6 Estimación de la producción de biomasa, la generación de biogás y el potencial energético en lecherías de la región de Los Ríos, Chile

Autores: Eliana Sotomayor y Alfredo Erlwein

Los Ríos, una de las dieciséis regiones en que se divide la República de Chile, cuenta con una superficie de 18 429.5 km². La agroindustria es uno de los sectores económicos más pujantes de la región, con una diversidad de productos, entre los cuales se destaca el rubro lácteo, que constituye el 27 % de la producción nacional de leche bovina en tan solo 2.44 % de la superficie nacional. En este estudio se analizará la generación de biogás y el potencial energético a partir de la producción de biomasa residual húmeda proveniente de purines de lecherías clasificadas según el tamaño del plantel.

2.6.1 Estimación de la biomasa residual

En el cálculo de la biomasa residual proveniente de purines se han considerado análisis de casos, fuentes bibliográficas y tesis de pre y posgrado que constituyen una importante base metodológica en relación con la estimación de potenciales de biogás en la región de los Ríos (Vermehren 2014, Ríos 2013).

Entre los supuestos asumidos para el cálculo de la biomasa residual en lecherías se encuentran:

- El período de producción de leche/vaca= 6 meses/año²¹
- La diferencia de peso/animal según el segmento productivo²²
- La producción de fecas/animal constante, 10 % del peso vivo
- La dilución de purines constante y equivalente a 50 %
- Las condiciones y la superficie del corral/animal constante²³
- La energía de biogás=6 kWh/m³ (se asume el 60 % de metano)

Cabe señalar que, en el caso de las lecherías de la zona sur de Chile, debido a la alta pluviosidad, las aguas de lluvia y las de lavado (de equipos e infraestructura) representan casi la mitad de los purines generados en las lecherías (Chamy y Vivanco 2007).

En las regiones de Los Ríos y Los Lagos una vaca en ordeño produce, en promedio, 105 l purín/día²⁴, de los cuales solo un porcentaje se puede destinar a procesos de digestión anaerobia. En general, la producción de purines está determinada por el manejo en los predios y el sistema de producción estabulado (con recolección de excretas) o basado en el pastoreo (las excretas en el potrero no son utilizables) (Chamy y Vivanco 2007), mientras que las dimensiones de los patios de espera definen en gran medida la cantidad de agua de lluvia recolectada. En la región de Los Ríos los animales estabulados no alcanzan el 5 %, debido a lo cual no se recolecta la gran mayoría del estiércol sólido, que se usa como abono en los potreros pastoreados (Chamy y Vivanco 2007).

En las lecherías del sur de Chile un animal bovino produce excretas equivalentes al 10 % de su peso vivo al día y la dilución de las excretas es de aproximadamente 50 % (Chamy y Vivanco 2007), lo que se traduce en una producción de purín equivalente al 20 % del peso vivo/vaca/día. Se considera solo el período recolectable, que es de 3 a 4 horas diarias durante 6 meses al año por vaca, en el caso de las explotaciones pequeñas y medianas.

En cuanto al peso promedio de la vaca en ordeño, se consideró la clasificación de estratos según el tamaño del plantel por productor, atribuyéndoles un peso mayor a los planteles de mayor tamaño. Esta segmentación se realizó con base en la clasificación realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (INE 2011), que define como pequeños productores lecheros a aquellos que poseen un ganado de entre 10 y 49 cabezas. De la misma manera, el INDAP se refiere a este segmento como "agricultura familiar campesina (AFC)"²⁵. El análisis del segmento superior a 50 vacas promedio en ordeño se realizó de acuerdo con la información derivada de la *Encuesta de ganado bovino* (INE 2011), cuyos resultados se presentan en la tabla 13.

²¹ Se asume que en la agricultura de pequeña escala los partos y la producción lechera se concentran en el período primaveral (septiembre-diciembre), tendiendo a la estacionalidad más que al funcionamiento continuo, así como que en este segmento los períodos de lactancia son menores que en los planteles altamente tecnificados.

²² Se acepta que los planteles más grandes y tecnificados presentarán animales más grandes (vacas de alta producción) que los planteles menores, por lo que los pesos por animal son diferentes, según el tamaño del plantel.

²³ La cantidad de purines de un plantel está determinada por la capacidad de recolección de estiércol (principalmente en los patios de espera) y el grado de dilución (definido por la separación de aguas de lluvia a través de techumbre y canaletas). La extensión de los patios y las techumbres varía de manera significativa entre planteles, variabilidad que se obvia para efectos de cálculo.

²⁴ Varía entre 34 a 260 l de purín/vaca/día.

²⁵ Los estratos definidos para el segmento de AFC se estructuraron según la información proporcionada por el Servicio de Asesoría Técnica, el Programa de Alianzas Productivas, el Programa de Desarrollo Territorial Indígena y el PRODESAL del INDAP.

Tabla 13. Detalle de número de animales y producción de purines por tamaño de plantel

Tamaño (vacas en ordeño)	Total de vacas en ordeño	Peso/vaca (kg) ²⁶	Establo (h/d)	Total de purines (m ³ /año)
0 a 9	1625	450	3	3336
10 a 24	4288	450	3	8804
25 a 49	3453	500	4	10 503
50 a 99	8751	500	4	26 618
100 a 299	17 967	550	4	60 115
300 y más	81 153	600	4	296 208
Total	115 148	-----	-----	405 584

Fuente: Elaborado con base en INE 2011.

De acuerdo con la tabla 14, la región de Los Ríos genera anualmente 405 000 m³ de purines provenientes de la lechería. De dicho total, el 5.6 % corresponde a pequeños productores.

2.6.2 Potencial teórico de biogás

Se calculó el potencial de generación de metano a partir del purín de vacuno de los productores con menos de 50 vacas en ordeño con base en información proveniente del INDAP, mientras que el de los productores con un plantel mayor a 50 vacas en ordeño se estimó de acuerdo con información obtenida por el INE. En la tabla 14 se presenta el total de purines producidos por vacas en ordeño de la región de Los Ríos. De conformidad con esta información, se calculó un valor teórico de generación de biogás para cada segmento. En el análisis se consideró que, por cada metro cúbico de purín de vacuno, se obtiene un rendimiento promedio de 25 m³ de biogás (Ministerio de Energía y GIZ 2012).

Tabla 14. Potencial valor teórico de generación de biogás a partir de la DA de purines de vacunos de lechería

Rango	Total de purines (m ³ /año)	Biogás (m ³ /año)
De 0 a 9	3336	83 408
De 10 a 24	8804	220 095
De 25 a 49	10 503	262 572
De 50 a 99	26 618	665 441
De 100 a 299	60 115	1 502 865
300 y más	296 208	7 405 211
TOTAL	405 584	10 139 592

²⁶ Los datos sobre el peso de los animales se obtuvieron mediante entrevistas a productores de la región de Los Ríos.

2.6.3 Estimación de la energía generada a partir del biogás obtenido

Para calcular la cantidad de bioenergía generada con biogás proveniente de lecherías se consideraron los usos de este en la producción de energías térmica (calor) y eléctrica. Se presentaron los valores de contenido calórico total y su equivalente en m^3 de leña y kg de gas licuado, a fin de ponderar el valor de sustitución de estos combustibles.

Se incluye un análisis de la autosuficiencia del biogás en la cocina de una familia rural campesina promedio. Con respecto a la estimación del autoabastecimiento, se da por hecho el uso de una cocina de leña y la disponibilidad de biomasa residual para el funcionamiento de un biodigestor en el lugar de residencia.

Si se trata de generación en pequeña escala, solo se evalúa el potencial térmico, dado que el costo y la eficiencia de los sistemas de cogeneración se pueden obtener solo a partir de una cantidad mínima determinada de biomasa/biogás, normalmente gestionada solo por grandes productores.

En el caso del calor, se presenta el contenido calórico total con una eficiencia del 100 %, considerando que en **calderas de alta eficiencia** (sobre el 90 %) los valores se aproximan bastante.

En cuanto a la generación de energía eléctrica, se calcula el potencial máximo teórico de la región completa, pues la cogeneración con biogás resulta económicamente viable solo a mayor escala, lo que dejaría fuera a la pequeña agricultura en términos individuales, pero no en términos colectivos (proyectos asociativos). En el caso de la electricidad, se evalúa solo la utilización de sistemas de cogeneración con motores de explosión de gas, ya que son de bajo costo y alta eficiencia en comparación con otras alternativas tecnológicas (eficiencia energética de 85 % de calor + electricidad).

Se presentan, además, los equivalentes en m^3 de leña y kg de gas licuado como las fuentes alternativas de uso más común en la región: la leña, por ser la opción térmica más barata y el gas licuado, porque constituye el segundo sustituto más accesible técnica y económicamente.

2.6.4 Potencial regional total

De acuerdo con los potenciales regionales de producción de biogás obtenidos, se calcularon los valores máximos posibles de generación térmica total (combustión directa) y de generación térmica eléctrica por medio de sistemas de cogeneración. Ambas tecnologías están disponibles en el mercado.

En relación con el potencial térmico, se consideró la combustión directa para efectos de sustitución con leña, utilizándose una eficiencia térmica de 60 %, equivalente a la que presentan las estufas de doble combustión. Asimismo, se consideró un contenido calórico de $5 \text{ GJ}/\text{m}^3$ de leña (con 20 % de humedad, el valor promedio de las distintas especies nativas más usadas) (AIFBN 2008), con un valor de 0.0072 m^3 de leña/ m^3 de biogás. En el caso del gas licuado, se empleó un valor equivalente a $13.4 \text{ kWh}/\text{kg}$, lo que da una tasa de recambio de 2.44 kg de gas licuado/ m^3 de biogás.

Los sistemas de cogeneración suelen estar compuestos por motores de combustión interna, cuya potencia activa generadores eléctricos que producen agua caliente a partir de su refrigeración, la cual se emplea en la alimentación de redes de agua caliente de edificios o grupos de viviendas, conocidas como redes distritales. Los valores de cogeneración asumen una eficiencia de transformación de calor y electricidad del biogás de 2.4 y 2 kW/m³, respectivamente. En la tabla 15 se presenta la capacidad de cogeneración térmica y eléctrica de la biomasa generada en lecherías de la región:

Tabla 15. Biogás total y máximo teórico de generación de energías eléctrica y térmica

Total regional	Biogás (m ³ /año)	Contenido calórico total ²⁷ (kWh)	Equivalente leña (m ³)	Equivalente gas licuado (kg)	Cogener. térmica (kWh)	Cogener. eléctrica (kWh)	Potencia eléctrica (kW)
Lecherías - purines	10 139 592	60 837 550	26 282	4 545 204	24 335 020	20 279 183	2315

2.6.5 Potencial regional de pequeña escala

En esta sección se presenta el potencial de producción de energía térmica de pequeña escala a partir de biogás y su equivalencia a otros combustibles utilizados alternativamente en una escala equivalente a la de la AFC. En el cálculo se utilizaron los valores de transformación correspondientes a los estratos de pequeña escala de producción presentados en la sesión 2.6.1, que considera el rango de 0 a 49 vacas en ordeño.

En la referencia a combustibles alternativos se utilizó el equivalente a 0.0123 de leña/m³ de biogás, dada las eficiencias equivalentes al uso de cocinas de leña tradicionales²⁸, con 35 % de eficiencia de combustión²⁹. En el caso del gas licuado, se utilizó el mismo valor utilizado para toda la región. En la tabla 17 se presentan los resultados relativos a la capacidad de generación de energía del segmento definido como pequeña escala.

Tabla 16. Biogás de pequeña escala y valores de sustitución de otros combustibles utilizados

Sector	Biogás (m ³ /año)	Calórico total (kWh)	Equivalente leña (m ³)	Equivalente gas licuado (kg)
Lecherías - purines	566 075	3 396 450	6987	253 751

2.6.5.1 Estimación del autoabastecimiento de biogás para la cocina de una familia rural promedio

El reemplazo de la cocina de leña tradicional por una cocina con quemadores de biogás podría ser una interesante alternativa tecnológica para las familias rurales, especialmente en zonas aisladas o lejanas a los centros poblados.

²⁷ Contenido calórico correspondiente al total de energía térmica teórica. Utilizando la eficiencia de combustión de una tecnología por emplear determinada se obtendrá directamente el potencial térmico total.

²⁸ Al respecto, véase el siguiente subcapítulo relativo a la autosuficiencia energética para la cocina de una familia rural promedio.

²⁹ Durante el período estival en el que no se requiere calefacción y todo el calor residual se pierde, la eficiencia de una cocina de leña tradicional es mucho menor, llegando a valores de transformación de 0.03350 m³ de leña/m³ de biogás, como se analiza en el siguiente subcapítulo.

Entre las ventajas de este reemplazo se incluyen:

- El aprovechamiento de fuentes de biogás disponibles en los predios. En el ambiente rural se dispone de diversos tipos de biomasa utilizable en la producción de biogás.
- El tratamiento de residuos. Los residuos orgánicos sólidos o líquidos sin descomponer pueden ser fuente de vectores, malos olores y patógenos. La biodigestión puede considerarse un tratamiento parcial o total de dichos residuos.
- La independencia/autonomía energética. Los usuarios no dependen de las condiciones externas (disponibilidad y precios en la región, el país o en el ámbito internacional), lo que posibilita la autosuficiencia de combustible en el plano doméstico.
- La comodidad de la operación de la cocina. La operación de una cocina de gas no supone tiempos de encendido ni calentamiento, como la de una cocina de leña. Además, con la de gas es posible dosificar el uso del combustible y, por tanto, del calor.
- Una mayor eficiencia energética y de los recursos. La sustitución de una cocina de leña por una de biogás y una estufa de leña de doble cámara (combustión lenta) genera importantes sinergias. Dado que la eficiencia de la cocina de leña es de alrededor de 35 % y de la estufa de doble cámara es de aproximadamente 60 %, la eficiencia de la calefacción del sistema puede casi duplicarse.
- Una importante reducción de la presión sobre los bosques/la deforestación. Dado que la eficiencia calórica del sistema se puede duplicar, la demanda de leña se puede reducir a la mitad, lo que contribuye significativamente a la disminución de la deforestación por consumo local de leña.

Entre los desafíos que supone el uso de este tipo de sistemas se pueden mencionar los siguientes:

- La incertidumbre en torno a la aceptación de la tecnología. Resulta vital conocer cómo esta tecnología se adapta a las costumbres y los conocimientos de las familias rurales para poder determinar si es una alternativa atractiva para ellas.
- Las necesidades de operación. Por tratarse de un sistema innovador, su operación implica nuevas actividades, tales como la recolección de materia orgánica, la manutención básica del equipo y la capacitación de los usuarios.
- El costo de inversión. La implementación de los biodigestores conlleva cierto costo de inversión, por lo que en una primera etapa los costos del hogar se elevan en forma significativa, lo que puede limitar a muchas familias con respecto a su uso. P. ej., los costos de un estanque de acero y de su instalación ascienden a USD 3200 aproximadamente, si se considera la producción de purín de 2 unidades de animal equivalente (Pérez Medel 2010).
- Las fugas potenciales de GEI. Si no es operado correctamente, un biodigestor puede presentar fugas de biogás, lo que puede implicar un aumento significativo de la huella de carbono de un hogar, dado que el poder de efecto invernadero del metano contenido en el biogás es 25 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO₂) emitido por la combustión.

En la tabla 17, elaborada con base en Erlwein y Sotomayor (2016), se presenta información referencial sobre el biogás necesario para el abastecimiento de una familia promedio de 4 personas y su equivalencia de ahorro en relación con otros combustibles.

Tabla 17. Ejemplo de autosuficiencia térmica familiar a través de la instalación y el uso de un biodigestor

N.º de personas/familia	4
Demanda de biogás en la cocina	
Consumo del quemador (m ³ /h)	0.3
Horas de uso del quemador/día ³⁰	2.2
Eficiencia calórica del quemador de biogás	95 %
Eficiencia de transmisión de calor del quemador de biogás	40 %
Total de biogás/familia (m ³ /año)	241
Sustitución de gas licuado por biogás	
Eficiencia calórica del quemador de gas	95 %
Eficiencia de transmisión de calor del quemador de gas	40 %
Equivalencia de kg de gas licuado/m ³ biogás	0.43
Equivalencia de gas licuado (kg/año)	104
Equivalencia de USD/año (kg gas licuado = USD 1100)	113 946
Sustitución de la leña para cocinar por biogás	
Calor de la leña (GJ/m ³) ³¹	5
Eficiencia calórica de la estufa de leña	35 %
Eficiencia de transmisión de calor de la estufa de leña	20 %
Eficiencia de uso de la estufa de leña ³²	70 %
Equivalente leña (m ³ /año)	8.1
Oferta de biogás a partir de residuos orgánicos para la alimentación familiar	
Residuos orgánicos/persona/día (kg)	0.5
Biogás de residuos orgánicos/persona/día (m ³)	0.075
Kg de residuos humanos sólidos/persona/día	0.3
Biogás de residuos humanos/persona/día (m ³)	0.028
Total de biogás a partir de residuos (m ³ /familia/año)	150
A partir del pasto (ensilaje)	
Biomasa empastada promedio (t MS/ha-año)	7
Biomasa fresca (30 % MS) (kg/m ²)	2.3
Biogás/kg biomasa fresca (m ³)	0.18
A partir de trigo (ensilaje)	

30 No incluye el agua caliente para los baños/las duchas (que se puede obtener de una estufa de leña con serpentín).

31 Leña con 20 % de humedad, que es el valor promedio de las distintas especies usadas en la región (AIFBN 2008).

32 Corresponde al tiempo útil cocinando. El promedio en invierno es 90 % y en el verano, 50 %. En el invierno es mayor, pues el calor residual se utiliza para la calefacción del hogar.

Biomasa promedio (t MS/ha) (aprox. 45 q)		10.4
Biomasa fresca (35 % MS) (kg/m ²)		3
Biogás/kg biomasa fresca (m ³)		0.22
M ² de biomasa necesarios para el autoabastecimiento de combustible de la cocina	Biomasa por usar	
	Pasto	Trigo (silo)
Sin uso de residuos domiciliarios	574	370
Con uso de residuos domiciliarios	216	139

Según la tabla anterior, para autoabastecer de gas la cocina de una familia promedio se requieren solo 574 m² de producción de pasto (verde), en caso de no agregar los residuos orgánicos de la casa. Por otro lado, con la recolección de residuos orgánicos (domésticos o agrícolas) se requieren solo 139 m² de trigo (para ensilaje, es decir, verde antes de la madurez) o menos superficie, si se tratase de maíz.

Si se considera el ahorro de leña para cocinar y si casi se dobla la eficiencia de combustión para la calefacción, **se puede reducir a menos de la mitad la necesidad familiar anual de leña**. Para ello es necesario desarrollar investigaciones acerca de la aplicabilidad de esta tecnología en el mundo rural, considerando las barreras técnicas y culturales y evaluando sus posibles impactos.

2.6.6 Referencias bibliográficas

- AIFBN (Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo, Chile). 2008. Usar leña conservando el bosque y contaminando menos: campaña por un uso eficiente y responsable de leña. Valdivia, Chile. 12 p.
- Chamy, R; Vivanco, E. 2007. Potencial de biogás: identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. Santiago, Chile, CNE. 80 p.
- Erlwein, A; Sotomayor, E. 2016. Estimación de la producción de biomasa, generación de biogás y su potencial energético. *In* INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario, Chile); GORE Los Ríos (Gobierno Regional de Los Ríos, Chile). Biogás de residuos agropecuarios en la región de Los Ríos: aspectos generales, experiencias y potencial de producción. Valdivia, Chile. p. 33-56.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas, Chile). 2011. Encuesta de ganado bovino. Santiago, Chile.
- Ministerio de Energía; GIZ (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional, Chile). 2012. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. Santiago.
- Pérez Medel, JA. 2010. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Memoria Ing. Santiago, Chile, Universidad de Chile. 83 p.
- Ríos, M. 2013. Estimación de la producción potencial de biogás a partir de purines bovinos en la región de Los Ríos (Chile). Valdivia, Chile, UACH.
- Vermehren, M. 2014. Estimación del potencial de producción de biogás en la región de Los Ríos a partir de residuos biodegradables. Valdivia, Chile, UACH.

Condominio de agroenergía en un municipio de Minas Gerais, Brasil: potencial para la producción de biometano a partir de residuos agrícolas

Autor: Adriano Henrique Ferrarez

2.7.1 Introducción

El aprovechamiento energético de los residuos de la producción agrícola mediante la codigestión anaerobia puede convertirse en una fuente de ingresos capaz de cubrir los gastos asociados a los servicios ambientales de la actividad agrícola. El biometano (biogás purificado) resultante de la codigestión puede ser utilizado por medio de la asociación de granjas en condominios de agroenergía (Bley Junior *et al.* 2009). Algunos de los beneficios de estos condominios son los siguientes: 1) la apropiación local de la energía, 2) la generación de empleo y 3) la reducción de impactos ambientales (Mangoyana y Smith 2011). Globalmente, los primeros proyectos de condominios de agroenergía surgieron en Europa a inicios de la década de los 80. La planta de generación de energía debe ubicarse de manera que beneficie a la mayor cantidad posible de productores rurales (Raven y Gregersen 2007).

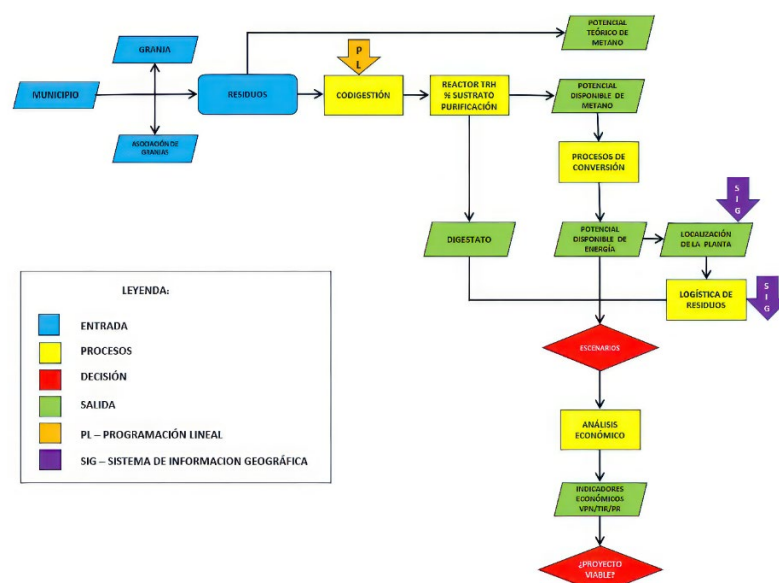
El objetivo de este trabajo es evaluar en un condominio de agroenergía integrado por granjas porcinas en el municipio de Jequeri, en el estado de Minas Gerais, Brasil: 1) el potencial del biometano producido a partir de desechos porcinos y de la codigestión con residuos agrícolas; 2) el potencial de generación de energía eléctrica con biometano; 3) el potencial de producción de biofertilizantes; y 4) la viabilidad económica, considerando el transporte de residuos a través de ductos o carreteras y el transporte de biometano mediante gasoductos.

2.7.2 Materiales y métodos

Para evaluar el potencial de generación de energía eléctrica, la producción de biofertilizante, el dimensionamiento de los condominios de agroenergía y la viabilidad económica se utilizó el Sistema de Evaluación del Uso de la Digestión Anaeróbica para el Dimensionamiento Energético (SAUDADE). Esta herramienta computacional consta de hojas de cálculo de Microsoft Excel y cuenta con una base de datos geoespaciales que crea un vínculo con el sistema de información geográfica (SIG) desarrollado en ArcGIS. Para optimizar la mezcla de residuos animales y vegetales y maximizar la producción de biometano se utilizó la programación lineal.

En la ilustración 41 se muestra un flujograma de la herramienta computacional desarrollada.

Ilustración 41. Flujograma de la herramienta computacional SAUDADE



Fuente: Adaptado de Ferrarez, 2015

Condominio de agroenergía en el municipio de Jequeri

El municipio de Jequeri tiene 12 845 habitantes, distribuidos en un área de 547 817 km² (IBGE 2014). La porcicultura es la principal actividad económica: hay 17 granjas y un hato de 143 151 cabezas (IMA 2013). Los principales cultivos agrícolas del municipio son: 1) café, 2) frijoles, 3) maíz y 4) caña de azúcar. En 2012 el consumo total de energía eléctrica fue de 3.9 GWh (CEMIG 2013).

Escenarios

Los escenarios simulados en el análisis económico consideraron: 1) el proceso de conversión de residuos en biometano (con y sin codigestión); 2) el transporte de residuos o biometano; 3) las fuentes de financiamiento (recursos propios o préstamo); y 4) la forma de comercializar la energía eléctrica generada.

2.7.3 Resultados y discusión

Condominio de Jequeri

En la ilustración 42 se muestra la ubicación del municipio de Jequeri.

Ilustración 42. Ubicación de Jequeri

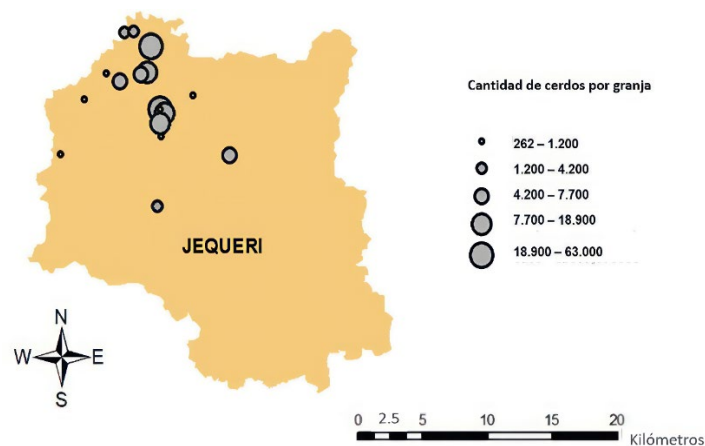


Fuente: Tomado de MINAS GERAIS 2014:3

El rebaño porcino del municipio produce 373 980.20 t/año. La carga contaminante de los desechos que se producen en las granjas de Jequeri es equivalente a la generada por una ciudad de aproximadamente 458 000 habitantes (Fleming y Ford 2001).

En la ilustración 43 se muestra la ubicación de las granjas porcinas en el municipio de Jequeri.

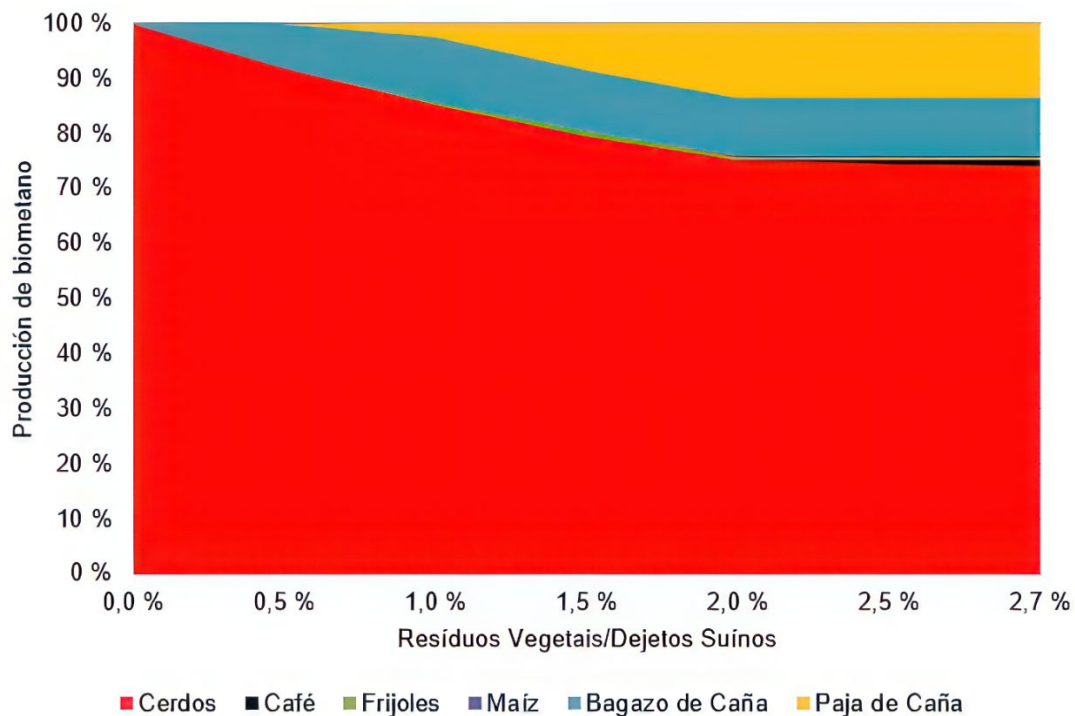
Ilustración 43. Ubicación de las granjas porcinas en el municipio de Jequeri



Se consideró que toda la energía eléctrica sería generada por medio de una planta centralizada ubicada en la granja con el hato porcino más grande.

En el gráfico 7 se muestra la producción de biometano por sustrato, considerando diferentes relaciones residuos vegetales/desechos porcinos del condominio de agroenergía de Jequeri.

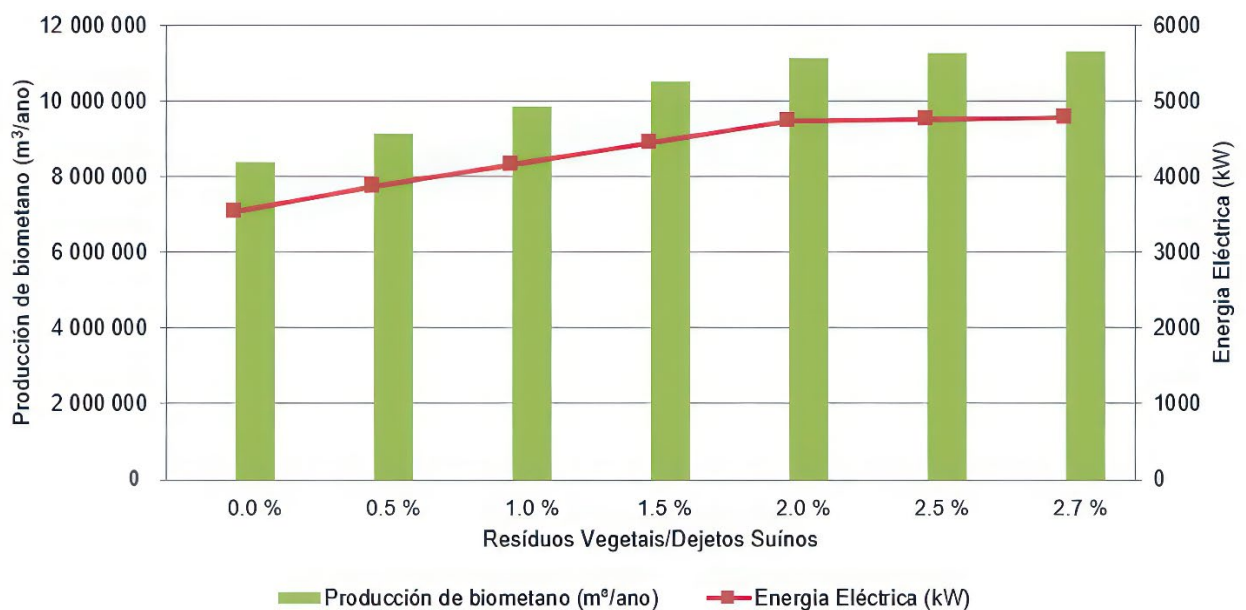
Gráfico 7. Producción de biometano por sustrato



Los desechos porcinos dan cuenta de la mayor parte del biometano producido, mientras que la contribución máxima de los residuos vegetales a la cantidad total de biometano generado es del 25.9 %.

En el gráfico 8 se muestra la producción de biometano y la respectiva cantidad de energía eléctrica generada.

Gráfico 8. Producción de biometano y energía eléctrica



La energía eléctrica generada a partir del biometano producido únicamente con desechos porcinos fue de 27.6 GWh/año, mientras que la codigestión de desechos porcinos y residuos agrícolas permitió generar 37.3 GWh/año.

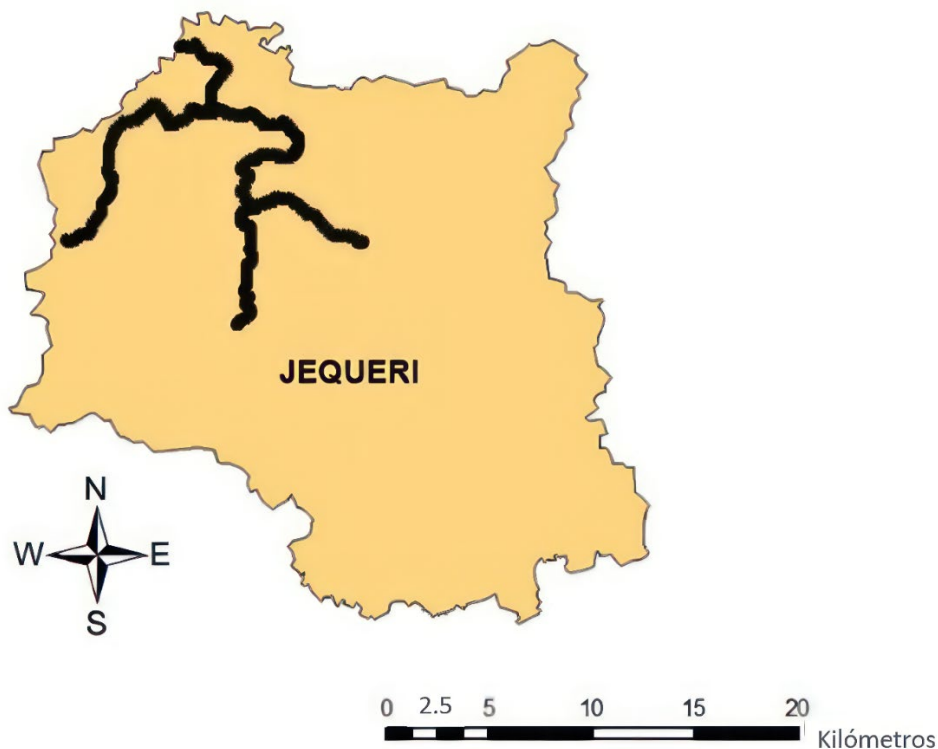
En cuanto a los macronutrientes constituyentes del biofertilizante obtenido del digestato, se observó que la producción anual de nitrógeno puede llegar a 1.4 Mt/año (sin codigestión) y a 1.45 Mt/año (con codigestión). La producción del macronutriente fósforo sin codigestión no varía con respecto a su producción con digestión, siendo en ambos casos de alrededor de 1.2 Mt/año. La producción anual del macronutriente potasio sin digestión es de 0.69 Mt, mientras que con codigestión es de 0.78 Mt.

2.7.4 Transporte de biometano y de residuos

Gasoducto/ducto de residuos

La longitud total de los ductos para conectar las 17 granjas porcinas del condominio de Jequeri es de 43.5 km. El gasoducto y el ducto de residuos transportarán biogás y residuos, respectivamente, a una planta de generación eléctrica centralizada (ilustración 44).

Ilustración 44. Trazado de los ductos en el municipio de Jequeri



120

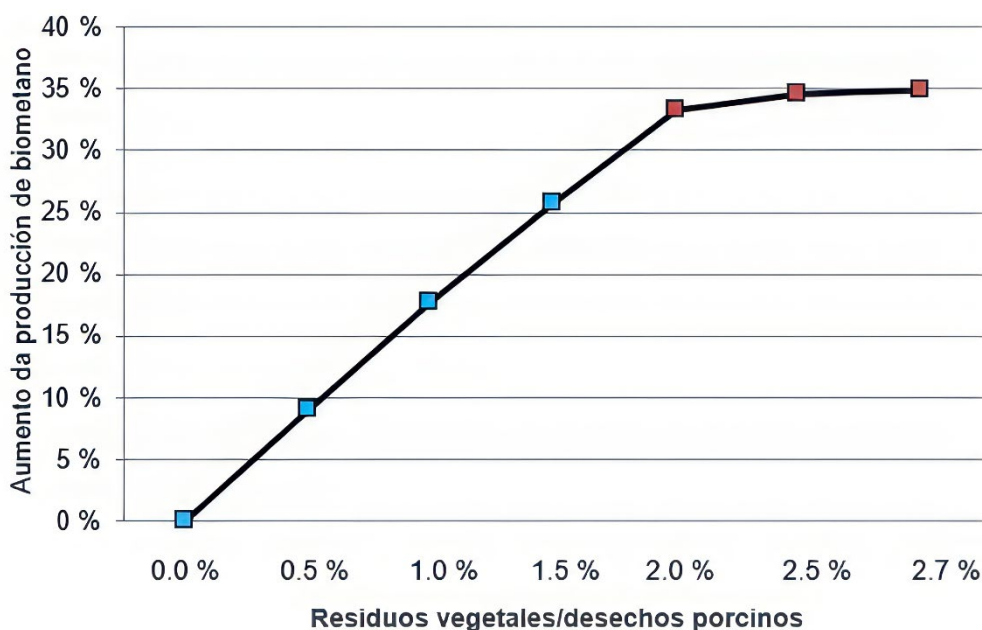
Transporte por carretera

En el municipio de Jequeri la longitud total de las rutas de transporte de desechos porcinos por carretera (desde las granjas hasta la planta de generación eléctrica) es de 174.6 km.

Análisis económico

En el gráfico 9 se muestra el aumento de la producción de biometano con la codigestión, considerando diferentes relaciones residuos vegetales/desechos porcinos y la viabilidad del condominio de agroenergía de Jequeri.

Gráfico 9. Aumento de la producción de biometano con codigestión



2.7.5 Conclusiones

A través del potencial de generación de electricidad en el condominio de agroenergía se atendió la demanda del municipio de Jequeri, logrando un excedente considerable. La codigestión demostró ser viable solo en escenarios donde la energía eléctrica se comercializó según el valor de las tarifas establecidas por los concesionarios junto con el biofertilizante y **con relaciones residuos vegetales/desechos porcinos de hasta 1.5 % (VPN > 0)**. Se deben implementar mecanismos de incentivos y políticas públicas que permitan implementar proyectos dirigidos al aprovechamiento energético de los residuos agrícolas mediante condominios de agroenergía.

2.7.6 Referencias bibliográficas

- Bley Júnior, C; Libânio, JC; Galinkin, M; Oliveira, MM. 2009. Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. 2 ed. rev. Foz de Iguaçu, Brasil, Itaipu Binacional. 140 p.
- CEMIG (Compañía Energética de Minas Gerais, Brasil). 2013. Brasil, CEMIG. Consultado 02 may 2022. Disponible en <https://www.cemig.com.br/>.
- Ferrarez, AH. 2015. Soluções energéticas para as cadeias produtivas de frango de corte e suinocultura na Zona da Mata de Minas Gerais (en línea). Tesis Doctotal. 398 p. Consultado 23 de enero de 2023. Disponible en <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7362>
- Fleming, R; Ford, M. 2001. Humans versus animals: comparison of waste properties (en línea). Consultado 20 abr. 2022. Disponible en http://www.ridgetownc.uoguelph.ca/research/documents/fleming_huvsanim_0107.PDF.
- IBGE (Instituto Brasileño de Geografía y Estadística). 2014. Pesquisa agrícola municipal (en línea). Consultado 12 sep. 2022. Disponible en <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=28&i=P>.

- IMA (Instituto de Minería y Ganadería, Brasil). 2013. Cadastro de suinocultores 2013.
- Mangoyana, RB; Smith, TF. 2011. Decentralised bioenergy systems: a review of opportunities and threats. *Energy Policy* 39(3):1286-1295.
- Raven, RPJM; Gregersen, KH. 2007. Biogas plants in Denmark: successes and setbacks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(1):116-132.

2.8 Potencial de producción de biogás en Argentina

Autoras: Nadia Gabbanelli y María Mercedes Echarte

Argentina tiene un gran potencial bioenergético debido al gran volumen y a la amplia variedad de fuentes de biomasa disponibles para producir energía renovable en su territorio (FAO 2020). Su fuerte actividad agropecuaria lo vuelve un país principalmente agroexportador, donde predomina la producción de cultivos de granos, oleaginosas y ganadera. Dentro de la actividad ganadera se destaca la producción de vacunos, aves y porcinos (Chorkulak 2016). Las principales industrias que generan residuos potencialmente utilizables en la producción de biogás son: la azucarera, la de frigoríficos, la de biodiésel y la cervecera. Todas estas actividades han conducido a un aumento de los residuos generados por esos sistemas productivos, los cuales no han sido tratados y están generando un gran impacto ambiental. El potencial de producción de biometano ha sido recientemente estimado en 14.40 billones de metros cúbicos, de los cuales 10.53 corresponden a cultivos secuenciales, 2.84 a residuos agrícolas, 0.86 a efluentes del ganado y 0.14 a subproductos agroindustriales (Dale *et al.* 2020). A pesar de este gran potencial, en el país la implementación de biodigestores es muy baja. Según un informe elaborado por FAO (2019a), esta situación responde a la "Falta de articulación entre una oferta (tecnológica) sin validar y una demanda escéptica o desinformada que no considera al biogás como una alternativa energética".

2.8.1 Condiciones edáficas/climáticas

En sus 3700 km de extensión de sur a norte, la República Argentina cuenta con una amplia diversidad climática, que abarca desde climas fríos al sur, hasta climas tropicales en las regiones del norte (Matteucci y Morello 2000). Estas condiciones climáticas generan combinaciones de varios tipos de vegetación o formaciones dominantes con distintas estructuras (p. ej., bosques, estepas y arbustales), varios tipos de climas (tropical, templado, frío, seco y húmedo) y un tipo fenológico dominante (siempreverde o semicaducifolio). La Argentina se divide actualmente en quince ecorregiones continentales que determinan la aptitud agroproductiva y las características sociales y culturales de los sistemas de producción agropecuarios (Burkart *et al.* 1999).

2.8.2 Producción agropecuaria

El uso de la tierra está principalmente comprometido en actividades agrícolas (oleaginosas, cereales, frutas y hortalizas), ganaderas y forestales que ocupan una superficie mayor a los 300 000 000 ha. La producción agrícola varía en las distintas regiones del país, pero se centra en la región centro-noreste (Ligier, 2012). Dentro de la producción de oleaginosas, en la última campaña (2020/2021) la soja representó el 84 % de la producción total de aceites (45 000 000 t), mientras que el girasol, el 15 %, entre los cereales se destaca la producción de trigo (20 500 000 t) y de maíz (51 000 000 t) (Bolsa de Comercio de Rosario s. f.). El arroz es uno de los

productos característicos de la región central, cuya producción es de alrededor de 1 570 000 t. Las frutas se producen principalmente en el norte de la Patagonia, donde se cultivan sobre todo manzanas y peras. Las uvas y los cítricos dulces representan cerca del 50 % del total de las frutas producidas en el país. La producción de hortalizas y legumbres oscila entre 8 y 10 millones de toneladas anuales y ocupa una superficie de 510 000 ha (FAO, 2016). La gran variedad de climas favorece la actividad hortícola durante todo el año, lo que permite un continuo abastecimiento en todo el país. La producción comienza el año en el centro y el sur del país, con especies del ciclo primavera-estival (tomate, pimiento, maíz y zapallo, entre otros) y la siembra de especies invernales (cebolla, ajo y repollo). La producción hortícola periurbana, que se lleva a cabo en las grandes ciudades de Argentina (p. ej., Bahía Blanca, Rosario, Mar del Plata y La Plata), genera los alimentos que se distribuyen a lo largo del país; no obstante, esta producción enfrenta desafíos relativos a la sostenibilidad ambiental que preocupan al sistema científico y a los tomadores de decisiones. Entre estas preocupaciones, la fertilización con residuos pecuarios sin tratamiento y la contaminación derivada de los residuos de la producción agropecuaria son las más frecuentes. Pese al gran volumen de residuos que podrían ser tratados por medio de la DA, los biodigestores no han sido aún adoptados por estos sectores productivos, que representan un sector interesante hacia dónde dirigir esfuerzos para la promoción de la tecnología.

La producción pecuaria se centra en la ganadería bovina, porcina y aviar. En cuanto al sistema de producción bovino, el engorde a corral (unidad de engorde) se ha establecido como complemento para la terminación del ganado vacuno para carne (Viglizzo y Frank 2010) y ha alcanzado una inserción significativa en la cadena. Actualmente existen más de 1900 unidades de engorde de tamaños diversos, ubicadas principalmente en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba.

El 80 % de la producción lechera y gran parte de los establecimientos porcinos se concentra en el centro del país (Marino *et al.* 2011), donde coinciden la disponibilidad de granos y los centros de faena y consumo. En el último estudio realizado por el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) se registraron 9906 establecimientos de producción lechera. La producción porcina evolucionó hacia sistemas de mayor intensificación, en los que los animales se encuentran en confinamiento absoluto y el ambiente está controlado (MINAGRO 2017).

En 2015 la cantidad de establecimientos analizados fue de 8664. Según indicadores de eficiencia productiva, se estima que en la Argentina el 39 % de los porcinos se encuentra bajo sistemas de producción en confinamiento, con una productividad promedio por madre de 20 animales terminados por año. El 61 % restante de las madres se encuentra bajo sistemas de producción en campo o mixtos y la productividad anual por madre se calcula en alrededor de 10 a 14 animales (FAO 2019b).

El sector avícola comprende la producción de carne aviar y huevos. Durante la última década la producción de carne aviar creció a un ritmo de 130 000 t/año, lo que implicó una faena de 1 600 000 t de carne anual en los últimos años. La cadena de la carne avícola incluye la reproducción (importación y cría de abuelos y producción de padres), la incubación (cría y reproducción de padres), el engorde (cría de pollos), la faena de las aves y la comercialización de su carne. Si

bien este tipo de producción se ha extendido por todo el territorio argentino, la provincia de Entre Ríos se destaca, debido a su perfil de exportador (OIT 2019). A mayor confinamiento, mayor es la disponibilidad de flujos de estiércol puro, cuyo empleo y tratamiento a partir de la DA es totalmente factible.

2.8.3 Actividad industrial

La actividad industrial relacionada con la producción agropecuaria tiene un alto potencial para la producción de biogás. Los residuos resultantes del proceso de transformación agroindustrial de la Argentina están representados principalmente por la transformación de la caña de azúcar, la vinificación, los frigoríficos y secaderos de fruta, el procesamiento de pescados y las producciones de biodiésel y cerveza.

En la Argentina operan 22 ingenios azucareros, distribuidos en su mayoría en la provincia de Tucumán, los cuales generan ingresos provenientes de la producción de azúcar y bioetanol a partir de la caña de azúcar y sus derivados (FAO, 2020). Más de 30 plantas medianas y grandes elaboradoras de biodiésel están localizadas principalmente en las provincias de Buenos Aires, Santa Fé y Córdoba. (MAGyP, 2022). La industria cervecera produce 5 000 000 t de cebada por año, posicionando al país entre los primeros exportadores del mundo. Se siembran más de 1 100 000 ha anualmente y se obtienen 797 000 t de malta, de las que el 25 % se destina al uso local.

2.8.4 Potencial biomásico

Residuos de actividades pecuarias

Según el último estudio de establecimientos de engorde bovino en corral, existe un total de 1 320 000 cabezas, con una producción diaria de estiércol fresco (mezcla de materia fecal y orina) en promedio de 23.9 kg por animal. Los efluentes de la producción lechera se generan en las salas de ordeño y están formados por agua de lavado de las instalaciones, agua del equipamiento (máquina de ordeñar y equipo de frío), estiércol y restos de alimento y tierra. Recientemente se evaluó un total de 3 400 000 de animales, con una producción de excretas promedio de 3 kg de estiércol fresco por animal en la sala de ordeño (FAO 2019b).

El purín de cerdo presenta valores muy variables de materia seca, de la cual alrededor del 85 % es materia orgánica (Franco y Panichelli 2013). La composición físico-química del efluente porcino varía mucho, de acuerdo con el sistema de producción, el tipo de explotación, la edad del animal, la dieta y el manejo de las granjas (p. ej., el tipo de bebedero, el manejo del agua y las aguas de lluvia). En 2017 la cantidad de gallinas ponedoras alcanzó los 47 000 000 (Prida 2017). En cuanto a la tecnología adoptada, conviven distintos sistemas de producción, entre ellos los clásicos, los antiguos, los abiertos y los galpones automatizados, que generan 1 300 000 t de guano al año (Bres 2019).

Considerando las principales actividades pecuarias (ilustración 45) y el potencial de producción de biogás de los residuos que estas generan (tabla 18), en Argentina sería posible producir a partir de estas actividades unos 926 000 000 m³ de biogás. Con un contenido de metano de 50 % y una eficiencia de conversión de energía térmica en eléctrica del 40 % (Gruber *et al.* 2010), se podrían generar anualmente 1852 GWh.

Tabla 18. Potencial de producción de biogás a partir de los principales residuos pecuarios producidos en Argentina

Tipo de producción	Existencias	Disponibilidad diaria (t estiércol/día)	Volumen de biogás (m ³ /t de estiércol)	Volumen total de biogás (m ³ /día)
Unidad de engorde	1 320 000	31 548	31.5	993 762
Tambo	3 424 645	10 274	31.5	323 631
Porcinos	4 726 245	16 069	49.5	795 415
Gallinas ponedoras	47 000 000	4700	90	423 000
Potencial total diario				2 535 808

Fuente: Elaborado con base en Prida 2017 y FAO 2019b.

Ilustración 45. Establecimientos de cría en la Argentina



A

B

C

Nota: corrales de engorde bovino (unidad de engorde A), criadero de gallinas ponedoras en galpón tradicional (B), tambo o lecherías (C) y criadero de cerdos en cama profunda (D).

Fuente: Tomado de FARMQUIP, Argentina, 2021: párr.1; El Litoral de Santa Fe 2020: párr.1 & Instituto Nacional de Agropecuaria 2022: párr.1

Residuos de la producción agrícola

Los residuos agrícolas (residuos de cosecha) comprenden los tallos, las hojas y otras estructuras (p. ej., mazorcas y cascarillas) de los principales cultivos. Estos residuos presentan una alta relación C/N y una alta proporción de lignina y celulosa en sus tejidos, por lo que podrían ser utilizados en combinación con residuos pecuarios para lograr un equilibrio óptimo de la relación C/N de los sustratos (Molinuevo-Salces *et al.* 2010). En Argentina los cultivos extensivos más promisorios respecto del aprovechamiento de estos residuos son el maíz y el trigo, debido a la extensión del área bajo producción y la gran cantidad de biomasa aérea que

queda como rastrojo luego de la cosecha (Erbetta *et al.* 2021, Gabbanelli *et al.* 2021). Otras fuentes aprovechables de residuos agrícolas son la caña de azúcar, el tabaco, la cebada, los frutales y la vid.

Tomando como ejemplo el cultivo de trigo (ilustración 46 a), con una producción anual promedio de granos de 20 000 000 t y un índice de cosecha aproximado de 0.45 (Gabbanelli *et al.* 2021), podrían obtenerse 24 400 000 t de residuos de cosecha. Varios autores demostraron que es posible retirar hasta el 50 % de estos residuos para su uso, sin comprometer la sostenibilidad del sistema (Wu *et al.* 2015). Por lo tanto, podrían destinarse a la producción de biogás 12 000 000 t de residuos de trigo. Considerando el potencial promedio de generación de biogás (412 m³/t MS) y un porcentaje promedio de metano de 51.1 % (Gabbanelli *et al.* 2021), sería posible obtener aproximadamente 5 000 000 000 m³ de biogás, que equivaldrían a 10 000 GWh anuales. De igual manera, los 76 000 000 t de rastrojo de maíz (ilustración 46 b) que cada año quedan en el campo, ofrecerían 38 000 000 t de biomasa que permitirían generar 17 670 000 000 m³ de biogás (Erbetta *et al.* 2021).

Ilustración 46. Ensayo de evaluación de cultivares de trigo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (A) y rastrojos de maíz (B)



Fuente: Tomado de Gabanelli *et al.* 2021

Residuos de la agroindustria

Pese a la importancia de la agroindustria nacional y a los desafíos ambientales que esta enfrenta, no existe para nuestro conocimiento un examen exhaustivo de la oferta potencial de biomasa húmeda de este sector para la producción de biogás.

En Argentina, durante la zafra de 2016, se obtuvieron en total 18 436 073 t de caña molida. Luego de la destilación del etanol de la melaza, se genera vinaza, un subproducto atractivo para la producción de biogás. Por cada tonelada de caña es posible obtener 0.13 m³ de vinaza y, por lo tanto, se podrían generar anualmente unos 2 400 000 m³ de vinaza por año (FAO 2020).

Considerando el potencial de producción de biogás de la vinaza ($40 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de vinaza), Argentina tendría la capacidad de producir $95\,000\,000 \text{ m}^3$ de biogás por año solamente a partir de la caña de azúcar (Ortiz y Erazzu 2019).

En 2018 la producción de biodiésel fue de $2\,400\,000 \text{ t}$ (Bolsa de Comercio de Rosario s. f.). Por cada 9 kg de biodiésel producido, se genera 1 kg de glicerina cruda. La glicerina, por su alto contenido en carbono, resulta un cosustrato ampliamente utilizado para lograr un equilibrio en la relación C/N de la DA de residuos pecuarios.

En Argentina la industria cervecera produce $20\,000\,000 \text{ hl}$ de cerveza por año (Cámara de la Industria Cervecera Argentina s. f.). Durante su proceso de fabricación se generan distintos tipos de residuos sólidos y líquidos. Por cada hl de cerveza producida se generan aproximadamente 20 kg de residuos sólidos (granos y levaduras usados y proteínas coaguladas). Con este tipo de efluente, la generación de biogás típica es de 0.75 a 1.12 m^3 de gas/kg de sólido procesado, por lo que la industria cervecera tiene la capacidad de producir $360\,000\,000 \text{ m}^3$ de biogás al año, equivalente a 720 GWh , que pueden ser aprovechados por la misma industria.

En el caso particular del proyecto de instalación de una unidad demostrativa de producción de biogás en Los Pinos, cobra relevancia el residuo de papa generado por una empresa productora de papas fritas y puré envasado (McCain Argentina S. A.). Esta empresa genera alrededor de 500 t diarias de residuos de papa que distribuye en diferentes destinos de tratamiento: el biodigestor de Los Pinos, las instalaciones de cría de moscas soldado negro y la disposición en tierra (*landfarming*). Si estos residuos se destinaran totalmente a la producción de biogás, considerando un potencial de producción de $606 \text{ m}^3/\text{t}$, sería posible obtener solo de este caso $110\,600\,000 \text{ m}^3$ de biogás (221.2 GWh).

Residuos sólidos urbanos

En 2010 (año del último censo poblacional) la población del país era de $40\,117\,096$ habitantes, repartidos en sus 23 provincias. La distribución espacial de los habitantes, que es irregular, se concentra mayoritariamente en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y la Provincia de Buenos Aires (el 38 % de la población del país) (FAO 2016). Varios informes sobre estudios de los residuos urbanos en todo el país establecen en promedio una generación de $0.85 \text{ kg}/\text{hab.}/\text{día}$. La provincia de Buenos Aires es la mayor generadora de residuos del país, con un total anual de $4\,639\,934.33 \text{ t}$, mientras que la provincia de Tierra del Fuego presenta la menor generación, de $31\,230.92 \text{ t}/\text{año}$. En la actualidad, Argentina genera un total aproximado de $36\,036.39 \text{ t}$ de residuos sólidos urbanos por día y de $13\,153\,282.19 \text{ t}$ por año (González 2010). El 50 % de estos corresponde a la fracción orgánica, que incluye desechos verdes y restos alimenticios generados de manera permanente. Si bien algunos trabajos encontraron una baja relación C/N, los resultados mostraron que es posible obtener 0.12 m^3 de biogás por kg de sustrato (Beily et al. 2010). El potencial de producción de biogás de la FORSU es de $790\,000 \text{ m}^3$ por año (1.59 GWh).

2.8.5 Conclusión de país

Argentina cuenta con una gran cantidad y variedad de biomasa para la producción de biogás. Los residuos derivados de las actividades agrícolas y ganaderas surgen como la principal fuente de biomasa. En particular, el aprovechamiento energético de los residuos pecuarios presenta un gran potencial en el país y supone **una reducción importante del pasivo ambiental que estos generan**. La instalación de biodigestores medianos y pequeños en estos establecimientos, que es reciente, se encuentra en pleno crecimiento (más de 20 biodigestores de bajo costo han sido instalados en los últimos 5 años).

Se debe llevar a cabo un estudio más completo de las actividades agroindustriales de diferente escala para poder evaluar en forma más certera el potencial de este sector, de gran importancia en la Argentina. La producción de la FORSU en comunidades pequeñas y de residuos hortícolas en el ámbito periurbano constituye un sector de sumo interés hacia donde se deben dirigir esfuerzos de promoción de biodigestores medianos.

Si bien el balance oferta-demanda de la biomasa para fines energéticos muestra un superávit en la mayor parte del territorio argentino, aún existen algunas barreras y desafíos de orden institucional, legal, económico, técnico y sociocultural que deben superarse para incrementar, de acuerdo con su potencial, la proporción de bioenergía en la matriz energética nacional. **En particular, el potencial estimado de producción de biometano a partir de todo tipo de fuente (14 400 000 000 000 m³) permitiría cubrir el 31 % de la demanda actual de gas natural comprimido (GNC) y, simultáneamente, reemplazar el total del gas que actualmente importa la Argentina (Dale et al. 2020).**

2.8.6 Referencias bibliográficas

- Beily, ME; Bres, PA; Rizzo, PF; Giampaoli, O; Crespo, DC. 2010. Monitoreo de un reactor anaeróbico semicontinuo para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos: parte II. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14:37-42.
- Bolsa de Comercio de Rosario. s. f. Estimaciones: estimaciones de producción (en línea, sitio web). Santa Fe, Argentina. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/gea/estimaciones-nacionales-de-produccion/estimaciones>.
- Bres, P. 2019. Optimización de la digestión anaeróbica del guano de aves ponedoras. Tesis Dr. San Martín, Argentina, UNSAM. 211 p.
- Burkart R; Bárbaro, NO; Sánchez, RO; Gómez, DA. 1999. *Eco-regiones de la Argentina*. San Martín, Argentina, PRODIA. 43 p.
- Cámara de la Industria Cervecera Argentina. s. f. Quiénes somos (en línea). Córdoba. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.cervecerosargentinos.org/quienes-somos>.
- Chorkulak, V. 2016. Análisis de la capacidad de generación de biogás en Argentina a partir de residuos orgánicos producidos en granjas con sistemas de confinamiento. Tesis Mgtr. Buenos Aires, Argentina, ITBA. 88 p.

- Dale, BE; Bozzetto, S; Couturier, C; Fabbri, C; Hilbert, JA; Ong, R; Woods, J. 2020. The potential for expanding sustainable biogas production and some possible impacts in specific countries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 14(6):1335-1347.
- de Abelleira, D; Banchemo, S; Verón, S; Mosciaro, J; Volante, J (coords.). 2019. Mapa nacional de cultivos: campaña 2018/2019 (en línea). Argentina, INTA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en http://inta.gob.ar/sites/default/file/mapa_nacional_de_cultivos_campana_2018_2019.pdf.
- El Litoral de Santa Fe. (2020, 28 diciembre). La rentabilidad del tambo en su punto ms bajo: se pierde casi \$1,50 pesos por litro. *Agritotal*. Recuperado 6 de diciembre de 2022, de <https://www.agritotal.com/nota/la-rentabilidad-del-tambo-en-su-punto-mas-bajo-se-pierde-casi-1-50-pesos-por-litro/>
- Erbetta, E; Echarte, L; Elizagaray, CR; Depetris, GJ; Gabbanelli, N; Echarte, MM. 2021. Stover biogas potential of corn crops grown under contrasting water availability and nitrogen supply. *Biomass and Bioenergy* 145.
- Farmquip Argentina. (2021). *Ganadería intensiva: desde la cría hasta la terminación a corral*. Farmquip Argentina. Recuperado 6 de diciembre de 2022, de <https://www.farmquip.com.ar/blog/255/ganaderia-intensiva-desde-la-cria-hasta-la-terminacion-a-corral/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Argentina). 2016. El estado de la biodiversidad para la alimentación y la agricultura en la República Argentina. Informe de País. Consultado 20 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.fao.org/3/CA3479ES/ca3479es.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Argentina). 2019a. Relevamiento nacional de biodigestores: relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico. Buenos Aires. 84 p. (Colección Documentos Técnicos, n. 6).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Argentina). 2019b. Estudio de cuencas de biogás (en línea). Buenos Aires. 58 p. (Colección Informes Técnicos, n. 4). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.fao.org/3/ca5726es/CA5726ES.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Argentina). 2020. Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina (en línea). Buenos Aires. 126 p. (Colección Documentos Técnicos, n. 19). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- Franco, R; Panichelli, D. 2013. Conceptos básicos para definir estrategias del manejo de efluente porcino. Jornada Nacional de Gestión de Residuos (1, 2013, Santa Fe, Argentina). Santa Fe, Argentina, INTA.
- Gabbanelli, N; Erbetta, E; Sanz Smachetti, ME; Lorenzo, M; Talia, PM; Ramírez, I; Vera, M; Durruty, I; Pontaroli, AC; Echarte, MM. 2021. Towards an ideotype for food-fuel dual-purpose wheat in Argentina with focus on biogas production (en línea). *Biotechnology for Biofuels* 14(85). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01941-X>.

- González, GL. 2010. Residuos sólidos urbanos Argentina, tratamiento y disposición final: situación actual y alternativas futuras (en línea). Cámara Argentina de la Construcción. 61 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.igc.org.ar/megaciudad/N3/Residuos%Solidos%20Urbanos%20CAMARCO.pdf>.
- Gruber, S; Hilbert, JA; Sheimberg, S. 2010. Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW con una planta de biogás de alta eficiencia: una planta de biogás en base de estiércol animal en mezcla de silaje forrajeras de maíz en el marco agropecuario argentino (en línea). Argentina, INTA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_bc-inf-16-10-generacion_electrica_con_biogas.pdf.
- Instituto Nacional de Agropecuaria. 2022. *Producción porcina en pequeña escala: Construcción de Túnel de viento ó Cama Profunda*. (2021). Instituto Nacional de Agropecuaria. Consultado 6 de diciembre de 2022. Disponible en <https://inta.gob.ar/documentos/produccion-porcina-en-pequena-escala-construccion-de-tunel-de-viento-o-cama-profunda>
- Koss, FE. Generación de biogás a partir de subproductos y efluentes líquidos de la industria de cerveza artesanal mediante digestión anaeróbica (en línea). San Martín, Argentina, USAM. 205 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/1327/1/PFI%203IA%202019%20KFE.pdf>.
- Ligier, D. 2012. Documento Base del Programa Nacional: Ecorregiones (en línea). Argentina, INTA. Consultado 20 de noviembre de 2022. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-documento_base_del_programa_nacional_ecorregiones.pdf
- MAGyP (Ministerio de Agricultura y Pesca). 2022. Informe Biocombustibles Enero 2022. Argentina. MAGyP. Consultado 19 de noviembre de 2022. Disponible en [http://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/bioenergia/informes/_archivos//000006_Informes%20Biocombustibles%2022/220100_Informe%20Biocombustibles%20\(Enero%202022\).pdf](http://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/bioenergia/informes/_archivos//000006_Informes%20Biocombustibles%2022/220100_Informe%20Biocombustibles%20(Enero%202022).pdf)
- Marino, M; Castignani, H; Arzubi, A. 2011. Tambos pequeños de las cuencas lecheras pampeanas: caracterización y posibles líneas de acción. Argentina, INTA. (Publicación Técnica, n. 61).
- Matteucci, S; Morello, J. 2000. Singularidades territoriales y problemas ambientales de un país asimétrico y terminal. *Realidad Económica* 169:70-96.
- MINAGRO (Ministerio de Agroindustria, Argentina). 2016. El estado de la biodiversidad para la alimentación y la agricultura en la república argentina. Buenos Aires, Argentina, FAO. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.fao.org/3/CA3479ES/ca3479es.pdf>.
- MINAGRO (Ministerio de Agroindustria, Argentina). 2017. Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes porcinos (en línea). Buenos Aires, Argentina. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/porcinos/informacion_interes/_archivos//000000_Buenas%20Pr%C3%A1cticas%20de%20Manejo%20y%20Utilizaci%C3%B3n%20de%20Efluentes%20Porcinos.pdf.

- Molinuevo-Salces, B; García-González, MC; González-Fernández, C; Cuetos, MJ; Morán, A; Gómez, X. 2010. Anaerobic co-digestion of livestock wastes with vegetable processing wastes: a statistical analysis. *Bioresource Technology* 101(24):9479-9485.
- OIT (Organización Internacional del Trabajo, Argentina). 2019. Estimación del empleo verde en Argentina (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.ilo.org/buenosaires/publicaciones/WCMS_750422/lang-es/index.htm.
- Ortiz, JM; Erazzu, LE. 2019. Energía de la caña de azúcar: producción potencial de electricidad a partir de vinaza de la industria sucro-alcoholera (en línea). Congreso Internacional de la Caña de Azúcar (30, 2019, Tucumán, Argentina). Argentina, INTA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://inta.gob.ar/documentos/energia-de-la-cana-de-azucar-produccion-potencial-de-electricidad-a-partir-de-vinaza-de-la-industria-sucro-alcoholera>.
- Polich, NL. 2019. Glicerol, residuo de la producción de biodiesel: posibles alternativas como materia prima para productos de mayor valor agregado. Tesis Mgtr. Santa Fe, Argentina, Universidad Nacional del Litoral. 98 p.
- Prida, J. 2017. Producción del huevo en Argentina. *Motivar*, Buenos Aires, Argentina; 1 abr.
- Viglizzo, EF; Frank, FC. 2010. Erosión del suelo y contaminación del ambiente. In Viglizzo, EF; Jobbágy, E (eds.). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental*. Buenos Aires, Argentina, INTA.
- Wu, Y; Liu, S; Young, CJ; Dahal, D; Sohl, TL; Davis, B. 2015. Projection of corn production and stover-harvesting impacts on soil organic carbon dynamics in the US temperate prairies. *Scientific Reports* 5(1):1-12.

.. Desafíos para desarrollar el potencial de producción de biogás en Honduras

Autores: Osmer Ponce y Carol Elvir

2.9.1 Antecedentes

Aunque la conversión de residuos orgánicos en biogás es una tecnología establecida que se ha infrutilizado, el aumento en la demanda y en el costo de la electricidad, así como su indisponibilidad en algunos lugares del país, han reavivado el interés en la implementación de la tecnología del biogás doméstico en Honduras.

La leña, que es la mayor fuente de energía de Honduras, representa el 46 % del consumo final y el 86 % del uso doméstico de la energía. En efecto, se calcula que al menos 1 000 000 de hogares (más de la mitad de los hogares hondureños) cocinan con estufas rudimentarias de leña (BID, 2015) Además, según la *Propuesta de nivel de referencia de emisiones por deforestación* sometida a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en 2018 la deforestación anual del país fue de 23 304 ha. Asimismo, de acuerdo con el Índice de Riesgo Climático, Honduras es uno de los países más vulnerables del mundo a los efectos del clima, que se incrementan debido a la deforestación y la degradación de los bosques.

Según datos del PNUD, en 2011 Honduras contaba con un potencial bruto de biogás derivado de diferentes actividades productivas (café, palma africana, granjas avícolas, mataderos, empacadoras de carne, procesadoras de leche, caña de azúcar, porquerizas y ordeño) en el orden de los 430 MNm³/año de biogás con 60 % de CH₄.

- Este potencial representa un total de 448.4 MWt de potencia térmica, equivalente a 180.8 MWe de potencia eléctrica, con un supuesto de conversión térmica en eléctrica del 40 % usado en el análisis.
- 105.6 MWt y 43.7 MWe de estos estarían disponibles solamente durante la zafra³³ (6 meses).
- 133.2 MWt y 53.3 MWe de estos se encontrarían disponibles solo durante la cosecha de café, a menos de que la codigestión se lleve a cabo con otros sustratos siempre disponibles, como el estiércol de cerdo o de ganado.

Probablemente la más importante de las muchas ventajas que ofrece el biogás es que constituye una solución energética descentralizada para las comunidades rurales hondureñas. Para introducirlo exitosamente, se debe presentar su concepto y mostrar el funcionamiento de esta tecnología a los usuarios potenciales. Este proceso debería iniciar con la identificación de las comunidades rurales que carecen de acceso a la electricidad, a fin de explicarles la operación de los biodigestores. Además, se debe elaborar un plan de desarrollo, dirigido a promover las innovaciones para lograr una economía sostenible basada en recursos, materiales y procesos biológicos.

La producción de biogás se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Organización de las Naciones Unidas (ONU), en especial, con el 1 y el 7. En este sentido, cabe mencionar que Honduras es signataria del Protocolo de Kioto.

Debido a la actual escasez de energía y al costo de reunir capital en el país, se ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía alternativas. Los mayores esfuerzos en los proyectos de biodigestión han sido liderados por la cooperación internacional (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional y Fondo Multilateral de Inversiones del Grupo BID) y algunas empresas en el ámbito privado, debido a lo cual se debe hallar un mecanismo de financiamiento en el que se promueva la sostenibilidad de este tipo de iniciativas.

2.9.2 Estudio de factibilidad de un programa nacional de biogás en Honduras

En 2010 se llevó a cabo el *Estudio de factibilidad para un programa de biogás en Honduras*, en el que se determinó que el aspecto cultural incide significativamente en la promoción y adopción de la tecnología. P. ej., de manera general, son los hombres quienes administran la producción y los ingresos, debido a lo cual es necesario llegar a un consenso con respecto a nuevas inversiones y asignaciones de tareas domésticas. Además, la alimentación del biodigestor suele implicar una nueva asignación de tiempo productivo al hombre (de 0.5 a 1 h). En este sentido, la toma de decisiones enfrentará obstáculos importantes que deberán ser superados con buenos argumentos, válidos en el contexto familiar rural, en términos del balance monetario de

³³ La cosecha de caña dulce para la elaboración de azúcar.

ahorros y gastos, la salud familiar y de la mujer y el uso del biofertilizante. Por otra parte, dos barreras para la adopción del biogás en los hogares rurales son la insuficiente aceptación del uso de excretas humanas, avícolas, porcinas y ganaderas y el fuerte arraigo familiar del empleo del fogón tradicional de leña.

En la actualidad la mayor parte de los habitantes de las comunidades rurales desconoce en su totalidad la tecnología del biogás; por lo tanto, esta debe ser explicada y demostrada a quienes disponen de materia orgánica, ya que la aceptación de su utilidad resulta fundamental para que estos se muestren dispuestos a adoptar esta tecnología como fuente de energía y tratamiento de residuos.

Es muy difícil diseñar una estrategia de mercado para esta tecnología, si sus promotores no comprenden las percepciones y preocupaciones de los propios beneficiarios. Algunas iniciativas en materia de biodigestión a escala doméstica y productiva están en marcha en el país, por lo que se debe diseñar una estrategia que aglutine a todos los actores interesados, que priorice el desarrollo de la tecnología y que esté liderada por una red nacional de biodigestores y por el Gobierno, mediante su Secretaría de Energía (SEN).

Cabe señalar que la introducción de una nueva tecnología requiere el apoyo político del Gobierno de Honduras, que necesita comprender cómo funciona la biodigestión, considerar las lecciones aprendidas del pasado con respecto a ella y conocer su potencial para mejorar la vida de los hondureños en general, junto con una estrategia de aprovechamiento de la biomasa (p. ej., complementar el esfuerzo de las estufas mejoradas). Hasta la fecha se dispone de muy poca o ninguna información sobre cuánto los tomadores de decisiones e incluso los hondureños promedio conocen el biogás o su tecnología. A menos que se tomen medidas para educar a las autoridades y al público en torno a las ventajas de emplear el biogás y para demostrar que las tecnologías de biogás son seguras y efectivas, hay pocas esperanzas de que el marco de políticas y el financiamiento inicial requeridos sean proporcionados por el Gobierno. Esto probablemente implicaría capacitar a varios facilitadores para que ayuden al público a asimilar el funcionamiento y la naturaleza de la producción de biogás.

En la actualidad, a pesar de la planificación intensiva y los esfuerzos realizados por la SEN y otras partes interesadas, seguimos careciendo de una estructura reglamentaria adecuada para respaldar el lanzamiento y la promoción de la tecnología de biogás a gran escala.

En consecuencia, los redactores de políticas públicas deben tener como objetivo no solamente conocer la disponibilidad de sustratos y agua, sino también poner el financiamiento de la tecnología a disposición de los beneficiarios, ya que el biodigestor debe ser sostenible en términos de costos. Aunque se trabaja en el Plan Nacional de Biogás para Honduras, no se visualiza en él políticas para la difusión de la tecnología de los biodigestores entre los pequeños productores. En la recientemente estrenada plataforma sobre el Sistema de Información Energética de Honduras la información acerca del potencial de biogás y sus usos es casi invisible.

Es importante definir acciones estratégicas y actores clave para la masificación de los biodigestores, p. ej., en el sector cafetero, identificar alianzas estratégicas y vincularlas a temas

de mercados que demandan productos más sostenibles por medio de las huellas de carbono y ambiental.

Finalmente, en la actualidad se vislumbra una ausencia de mecanismos financieros dedicados, incentivos o subvenciones dirigidos a la adopción de programas de biogás en zonas rurales vulnerables. A pesar de los avances logrados en materia de políticas en los últimos años, sigue habiendo un vacío que debe llenarse.

2.9.3 Conclusiones

Se ha demostrado que la educación y la exposición de experiencias exitosas son herramientas clave para aumentar la adopción del biogás en las zonas rurales y de pequeña escala comercial de Honduras. Su uso podría contribuir a desbloquear la gran promesa que supone construir una bioeconomía para aliviar la pobreza en dichas zonas, tanto en lo que respecta al suministro de energía como a un mejor nivel de vida.

En el país existe una colaboración exitosa entre la investigación y la participación de la comunidad, que puede generar conocimientos y habilidades transferibles dirigidas a lograr la adopción del biogás como una forma de energía renovable.

Además, el Gobierno debe desempeñar un papel en la difusión de esta tecnología como fuente de energía renovable en las zonas rurales, a fin de impulsar su adopción. Además, la construcción de biodigestores piloto en comunidades rurales mostrará a sus miembros las ventajas prácticas de esta tecnología y les ayudará a disfrutar de sus beneficios.

Los formuladores de políticas deben tener en cuenta que la educación es una fuerza impulsora, ya que puede eliminar los conceptos erróneos con respecto a la tecnología y brindar las capacidades necesarias para su adecuado desarrollo. Por lo tanto, es necesario que el Gobierno proporcione plataformas para el aprendizaje y la demostración de la tecnología del biogás, con el fin de apoyar y extender la aplicación de esta forma sostenible de energía.

Asimismo, junto con la formulación de estas políticas, se debe avanzar de forma paralela en la creación de la Red de Biodigestores de Honduras, que podría definir una visión alineada con los valores de la RedBioLAC.

2.9.4 Referencias bibliográficas

- Álvarez, MA. 2018. Análisis de la cadena de valor de café en Honduras. 1 ed. Tegucigalpa, Honduras, Heifer Internacional. 40 p.
- BID. 2015. Identificación y Priorización de Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA) en los Sectores de Agricultura, Transporte y Eco-fogones en Honduras. Honduras, BID.
- Filomeno, S; Bron, W; Sosa, B; van Nes, W. 2010. Estudio de factibilidad para un programa de biogás en Honduras. Tegucigalpa, Hivos. 69 p.
- Hernández, E; Samayoa, S; Álvarez, E; Talavera, C. 2012. Estudio sobre el potencial de desarrollo de iniciativas de biogás a nivel productivo en Honduras. Tegucigalpa, SNV.

.. Potencial de producción de biogás en Cuba

Autores: Luis Cepero Casas, José Antonio Guardado y colaboradores

El potencial de producción de biogás es estimado esencialmente por las instituciones y los organismos encargados de computar y analizar la cantidad de biomasa generada en un determinado ámbito geográfico. En Cuba este se calcula según la cantidad de biomasa residual disponible, derivada de las excretas de diferentes especies animales como la porcina, la vacuna y la aviar, la cual hoy está contabilizada, de acuerdo con el *Atlas de bioenergía*, elaborado en 2018 (González Aguiar 2018). En el futuro este potencial variará significativamente a partir de la implementación de un ordenamiento que abarca todas las ramas de la economía, pero que se enfoca fundamentalmente en lograr una transformación de la matriz energética, entendiendo en primer lugar el potencial de la biomasa parcial o total aprovechable. Los resultados que se muestran a continuación fueron extraídos de las estadísticas nacionales relacionadas con la masa porcina, aviar y de ganado mayor utilizable en la producción de biogás a partir de sus excretas.

Para estimar el potencial de biogás se deben tener en cuenta otros factores como la alimentación del animal, su peso vivo, su categoría, la temperatura media ambiental, el tiempo de retención hidráulica y el tipo de tratamiento, entre otros. En este análisis solo se consideraron aquellos animales que se encuentran semiestabulados, así como el tiempo durante el cual permanecen así, por ser el espacio viable donde se puede recolectar la excreta para procesar (Sosa Cáceres y Cepero Casas 2018).

Los resultados presentados aquí se basan en los datos brindados por el Grupo Empresarial Ganadero (GEGAN) y sus divisiones porcinas, vacuna y aviar, así como por la Oficina Nacional de Estadística e Información, el Instituto de Investigaciones Avícolas, el IIP, el Centro de Investigaciones para el Mejoramiento Animal de la Ganadería Tropical, la EEPFIH y la CUBASOLAR, representada por el MUB.

Para ello se empleó la siguiente metodología de cálculo, teniendo en cuenta que las crías porcinas y aviares siempre están estabuladas y cuentan con un sistema de evacuación de las excretas, debido a lo cual el potencial de tratamiento es del 100 %. En el caso de las crías vacunas, según la información recopilada por cada una de las instituciones de trabajo y la división vacuna del GEGAN, así como el criterio de algunos especialistas, se acordó que el promedio de tiempo efectivo de recolección de la excreta en el país es de 4 horas, lo que significa que solo se puede recoger para su tratamiento anaerobio el 20 % de las excretas. Dicho promedio se estableció para calcular este potencial, así como para determinar los potenciales de producción de biogás en las condiciones de Cuba, considerando las tecnologías de tratamientos disponibles, los tipos y sistemas de alimentación más utilizados, la gestión de la cría y las condiciones ambientales.

Los resultados a partir de las referencias consultadas, así como de las estimaciones asumidas para determinar las cantidades de excretas y orina y los índices de producción de biogás en ganado porcino, vacuno y aviar, se indican en la tabla 19.

Tabla 19. Cantidades de excretas y orina e índices de producción de biogás en ganado porcino, vacuno y aviar

Indicadores	Porcino	Vacuno	Aviar
Porcentaje de excretas con respecto al peso vivo (%)	5	9	9.15
Porcentaje de SV (% SV) en relación con los ST	12	13	17
Índice de producción de biogás (m ³ /kg de SV)	0.45	0.25	0.460

Fuente: Elaborado con base en González Aguiar 2018.

Con estos datos se calcula el potencial de producción de biogás en ganado porcino, vacuno y aviar, que corresponde primero al cálculo de la biomasa o excreta total por tipos de animal, teniendo en cuenta su cantidad y categoría y usando las siguientes fórmulas:

- 1) $Rd = NC * PVP * \% R$, donde cada término significa lo siguiente:

Rd = cantidad de residuos o excretas por día (kg/día)

NC = número de cabezas de animales

PVP = peso vivo promedio

% R = porcentaje de excretas y orina en relación con el peso vivo

- 2) $Pdbio = Rd * \% SV * Bsv$, donde cada término significa lo siguiente:

Pdbio = producción diaria de biogás

% SV = porcentaje de sólidos volátiles

IPbio = índice de producción de biogás

Una vez planteadas estas ecuaciones y empleando datos de diferentes laboratorios, instituciones científicas y universidades, se procedió al cálculo de los valores promedio por cada tipo de animal y categoría, los cuales se indican en la tabla 20.

Tabla 20. Volúmenes de residuos orgánicos (excretas y orina) y producción de biogás derivada del ganado porcino, aviar y vacuno considerado para el cálculo en Cuba

Especie	Categoría por especie (CE)	Volumen de residuos (kg/día)	Producción diaria de biogás (m ³ /día/animal)
Porcina	Reproductora	7	0.38
	Semental	7.5	0.40
	Cochinato y cochinas ³⁴	6.5	0.35
	Ceba (engorde)	2.75	0.15
	Lechones ³⁵	2	0.11
	Preceba (preengorde)	1.5	0.08
	Crías	0.35	0.02
Aviar	Reproductora	0.183	0.014
	Ponedora	0.145	0.011
	Reemplazos	0.07	0.006

³⁴ Cerdo/a menor de un año

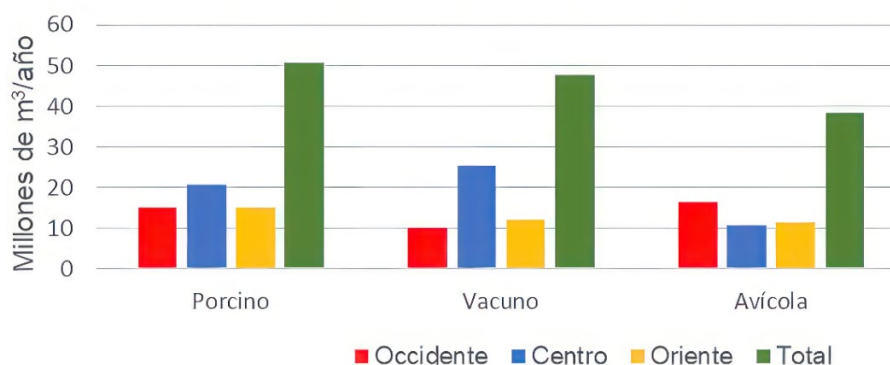
³⁵ Se refiere a un animal que todavía mama.

Vacuna	Vaca lechera o de engorde	27	0.88
	Toros de engorde	36	1.17
	Torete	22.5	0.71
	Terneros(as)	4.5	0.15
	Añojas	4.05	0.13
	Novillas	6.5	0.20

Fuente: Elaborado con base en González Aguiar 2018.

Los resultados indican que en la región central el ganado porcino y el vacuno presentan el mayor potencial de producción de biogás y en la región occidental, el ganado aviar (gráfico 10).

Gráfico 10. Potencial de producción de biogás por regiones de los sectores porcino, vacuno y aviar en Cuba

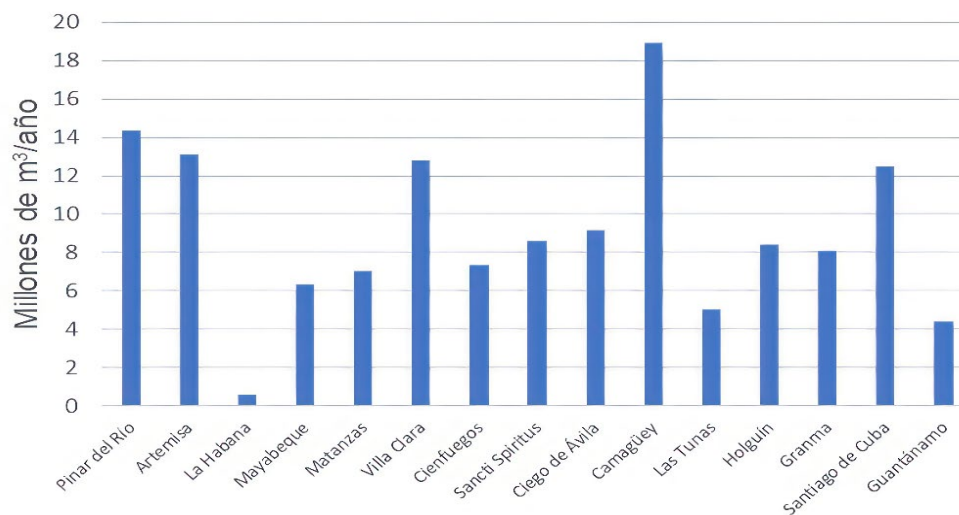


137

Fuente: Tomado de González Aguiar 2018: 13

Según se aprecia en el gráfico 11, todas las provincias del país pueden producir más de 4 000 000 m³ de biogás por año, excepto La Habana, que es una ciudad y prácticamente no tiene sectores agrícolas considerables. En este caso y el de otras ciudades del país, se debe calcular el potencial de los desechos municipales orgánicos biodegradables para su consideración en el potencial, además de transformarlos para contribuir al establecimiento de una economía circular, a una mejor gestión ambiental, a la mitigación de los efectos del cambio climático y a la producción ecológica de alimentos sanos.

Gráfico 11. Potencial de producción de biogás por provincias derivada del ganado porcino, vacuno y aviar en Cuba



Fuente: Tomado de González Aguiar 2018:14

Como ya se mencionó, el potencial de biogás está asociado solamente a los residuos de las excretas de los sectores ganaderos porcino, vacuno y aviar. Ni los demás sectores de la ganadería cubana ni los otros residuos de origen orgánico de los cuales se puede producir biogás se han considerado en el análisis, ya que no se dispone de la información correspondiente.

Fundamentalmente, se pretende utilizar todo este potencial de biogás disponible en la sustitución de combustibles fósiles empleados en la cocción de alimentos, el calentamiento del agua, la conservación de los alimentos y el alumbrado de las viviendas. Las grandes concentraciones de biogás que no se pueden distribuir en redes ni usar directamente en los hogares se destinarán a la generación de electricidad. En el caso de los bioabonos líquidos y sólidos, se propone emplearlos en su totalidad en la agricultura y los suelos, con el objetivo de producir una mayor cantidad de alimentos para humanos y animales.

2.10.1 Referencias bibliográficas

González Aguiar, L (ed.). 2018. Atlas de bioenergía: Cuba: sector agropecuario y forestal. La Habana, Cuba, CUBAENERGÍA. 84 p.

Sosa Cáceres, CR; Cepero Casas, CL. 2018. Biogás. *In* González Aguiar, L (ed.). Atlas de bioenergía: Cuba: sector agropecuario y forestal. La Habana, Cuba, CUBAENERGÍA. p. 18-44.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

TECNOLOGÍAS DE UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS CON FINES TÉRMICOS, MECÁNICOS Y DE COMBUSTIBLE

Autores: Claudio Moreno, Federico Vargas, Jessica Agresott, Joaquín Viquez, José A. Guardado, José María Rincón, Luis Cepero, Mercedes Echarte y Nélide Nancy Pose

En ALC la implementación de proyectos de biogás es una alternativa viable para la gestión sostenible de residuos orgánicos, pues sus amplias aplicaciones conllevan beneficios productivos, económicos, sociales y ambientales y, en consecuencia, **el mejoramiento de la calidad de vida de los beneficiarios, principalmente en las zonas rurales**. El biogás ha demostrado ser muy versátil, por lo que, a diferencia de otros combustibles, se puede utilizar en la calefacción, la cocción, la refrigeración y la generación de energía mecánica o eléctrica.

Demostrar esta realidad a los tomadores de decisiones supone monitorear los proyectos locales en marcha para conocer sobre los usos del biogás y la satisfacción de necesidades en los hogares, así como identificar las necesidades locales de forma anticipada para prever acciones de planificación y desarrollo. Ya existe una gran cantidad de artefactos de diseño local para la transformación del biogás en diversas formas de energía; no obstante, aún **se requiere diseñar estrategias para lograr su adopción en forma masiva, integrando la mayor cantidad de flujos posibles a lo largo de la región**. La toma de decisiones y la planificación de estos proyectos se debe realizar de manera continua y participativa con los futuros usuarios, para capacitarlos en función de la demanda.

En la región la implementación de biodigestores y redes comunitarias de biogás es incipiente. El acompañamiento de estos proyectos con políticas públicas y normativas claras dirigidas a garantizar la seguridad de las instalaciones, promover el diseño y la construcción local de instalaciones robustas y establecer esquemas de gestión y comercialización de los productos con participación de sus usuarios resulta crítico para asegurar la sostenibilidad de los proyectos y su continuidad en el tiempo.

Una red de biogás resuelve un problema observado en muchas zonas geográficas: la cantidad de biogás generada no corresponde con el consumo en el sitio, es decir, con la demanda. Por consiguiente, efectuar ajustes en los proyectos en marcha es importante para el desempeño adecuado de los futuros proyectos. Además, se deben incluir **proyectos bandera en los planes nacionales de los ministerios de Energía, Agricultura, Medio Ambiente, Educación y Trabajo e incluso de forma transversal, dada la pobreza energética presente en toda la región**. En pueblos y asentamientos humanos de pocos cientos o miles de habitantes existe un limitado acceso a la energía, que afecta de manera significativa a la sociedad.

Entre las medidas por tomar para satisfacer las demandas locales de forma más orgánica y con un mayor acompañamiento se incluye el **desarrollo local de los diversos dispositivos y accesorios que permiten el aprovechamiento del biogás**. Se requiere tecnología accesible, no

solo en términos de costos, sino también de disponibilidad geográfica y temporal para la producción y el acondicionamiento del biogás, esto es, la remoción de H_2S y la presurización (los aparatos requieren una presión estable, sobre todo en la refrigeración). Esto es difícil de conseguir en biodigestores familiares que, p. ej., no constituyen domos fijos o flotantes. Se debe asegurar su manejo adecuado y generar las condiciones para que la industria local pueda fabricar los accesorios en todas las escalas para facilitar su aprovechamiento, con el fin de abordar la pobreza energética y reemplazar los combustibles de origen fósil o complementar la biomasa local.

La posibilidad de transformar el biogás en biometano a través del desarrollo de tecnologías disruptivas y ambientalmente amigables abre un abanico de posibilidades para el uso del biogás, que se halla en plena expansión en los países del norte. En América Latina el aprovechamiento exitoso de estas tecnologías se logrará solo si se superan los obstáculos mencionados.

El trabajo en red representa una oportunidad para desarrollar de manera conjunta soluciones para satisfacer las necesidades más apremiantes en materia de implementación y asistencia en nuestros países y subregiones latinoamericanas.

Cabe mencionar que el biogás sigue siendo algo novedoso, por lo que la población promedio aún no sabe aprovecharlo. Pensamos que **el establecimiento de empresas o instituciones que den mantenimiento preventivo y reactiva, que cuenten con productos y presencia local** y que eventualmente se vinculen a infraestructura regional pública podría resolver la barrera de la operatividad, junto con programas de visibilidad y educación en diversos niveles. Ello, sumado a la adaptación de las regulaciones a los proyectos, facilitará los procesos de masificación de las instalaciones.

Por último, **las regulaciones no deben aprobar proyectos de biogás que no incorporen el aprovechamiento del combustible en el largo plazo**. Mediante antorchas de seguridad otras iniciativas público-privadas deben evitar que este sea eliminado.

3.1 Descripción completa de diferentes alternativas de uso del biogás

3.1.1 Introducción

El biogás, como producto del proceso de la DA de la fracción orgánica de residuos, se emplea como fuente de calor, combustible para diversos motores, en la generación de electricidad e incluso en vehículos.

Desde su concepción hasta nuestros días el biodigestor se ha catalogado como un **sistema de tratamiento** de aguas residuales. En la actualidad se emplea también para producir biogás a partir de distintos tipos de biomasa. Los principales objetivos de ese tipo de instalaciones son:

- A. Transformar y estabilizar los residuos orgánicos para eliminar las amenazas a la salud humana y animal, proteger los recursos naturales de la contaminación ambiental y mejorar las condiciones higiénico-sanitarias y la vida en el campo y la ciudad.
- B. Por medio del uso del digestato/biol o efluentes (producto del proceso de DA), suministrar nutrientes básicos para la fertilización de los suelos, los cuales inciden directamente en la producción de alimentos.

- C. Disminuir la contaminación del aire y contribuir a la reducción de emisiones de GEI. El uso integral y adecuado de una planta de biogás conlleva la mejora del suelo, la producción de alimentos sanos, la protección del medio ambiente y la disminución del consumo de energía fósil; por lo tanto, se debe usar todo el biogás producido en el sitio como fuente de energía directa (primaria) en la cocción de alimentos con fogones y ollas, el calentamiento y la esterilización de agua, la refrigeración para la conservación de los alimentos, la generación de electricidad, etc.

En este capítulo se comparten de forma resumida las experiencias actuales en el uso del biogás en América Latina, incluidas algunas en los planos térmico, mecánico y eléctrico, abordando los temas de redes de distribución y de innovaciones en la producción y el aprovechamiento del biogás.

3.1.2 Experiencia en los usos térmicos del biogás

El uso térmico del biogás abarca cualquier aplicación de este en la generación de calor para la cocción, la calefacción, la iluminación e incluso la refrigeración. A continuación se presentan algunas experiencias concretas en este sentido.

3.1.3 Estufas a biogás: experiencias en Costa Rica y Cuba

En América Latina la estufa (cocinilla, anafe, hornalla, etc.) es el aparato en el cual se efectúa el aprovechamiento más común y quizás el más sencillo del biogás. Se trata de la combustión directa del biogás a una llama para utilizar el calor generado. Existen varias publicaciones y experiencias en torno a la fabricación y adaptación de estufas. En la ilustración 47 se muestran diferentes adaptaciones de estufas que utilizan el biogás como combustible.

Ilustración 47. Estufas o fogones más utilizados y sus adaptaciones en América Latina



Adaptar una estufa o fabricar una casera, como se muestra en las imágenes anteriores, es relativamente fácil. El éxito radica en lograr que funcione con la **mayor eficiencia térmica** posible (Caydiid y Adhiambo 2017). La eficiencia térmica es la cantidad de energía en forma de calor que se logra transformar a partir del biogás. Una estufa bien diseñada o adaptada puede

alcanzar una eficiencia térmica de entre 30 % y 35 %, mientras que una mal diseñada puede presentar una de alrededor del 15 %, lo que se traduciría en el empleo de una mayor cantidad de biogás en la misma tarea, p. ej., para hervir la misma cantidad de agua.

La adaptación más común que se realiza a las estufas es el incremento del diámetro del orificio de inyección del gas. Esta adaptación es adecuada cuando la presión del biogás utilizado es mayor a 15 mbar y cuando el biodigestor es de domo fijo o flotante. En el caso de los biodigestores flexibles (p. ej., de bolsa), en los que se efectúa una conexión directa del biogás al quemador, la eficiencia térmica se puede mejorar al incrementar el ingreso de aire secundario (Viquez 2019). En la ilustración 48 se muestran estas tres alternativas, utilizadas en Costa Rica.

Ilustración 48. Adaptación de una estufa a través del 1) incremento del diámetro del orificio de inyección, 2) la conexión directa al quemador y 3) el mayor ingreso de aire secundario



143

Otra utilización es la que se realiza en **ollas arroceras** de biogás, fabricadas normalmente en China e India y comercializadas por diferentes empresas (p. ej., Puxin). Estas ollas están disponibles también en Cuba, gracias a diferentes proyectos internacionales dirigidos a promover el uso del biogás con fines domésticos en el medio rural, lo cual permite mejorar el nivel de vida de las familias rurales y posibilita el consumo adecuado del biogás. Se han instalado diferentes prototipos con volúmenes de 1.5, 3 y 6 l, principalmente (ilustración 49).

Ilustración 49. Ollas arroceras que funcionan con biogás



Estas ollas presentan en su interior un sistema de quemador que funciona con un chispero para su encendido semiautomático. Tienen dos modos de consumo de biogás: uno lento, con una

llama débil, mediante el cual se mantiene la temperatura de los alimentos después de su cocción, y otro alto, con una llama fuerte, para la cocción de los alimentos.

En general, el consumo de biogás de una estufa depende de su **potencia** y esta, de su tamaño: cuanto más grande es la estufa (o su potencia), mayor es el consumo de biogás. El consumo típico de una estufa es de entre 0.5 y 0.6 m³ de biogás/h, pero puede alcanzar los 1.5 m³/h en una olla de alta potencia u oscilar entre 0.2 m³/h y 0.4 m³/h en una olla arrocera.

3.1.4 Calefacción e iluminación

Otra aplicación del biogás en la que se reportan experiencias exitosas es en la **calefacción**. Esta se utiliza principalmente en granjas porcinas, donde el estiércol de los cerdos se convierte en biogás que se usa en la calefacción de los lechones. Este sistema es práctico y económicamente viable en granjas reproductoras o de ciclo completo y, mejor aún, si se están sustituyendo las lámparas eléctricas infrarrojas, es especial en climas fríos.

La calefacción se genera por medio de criadoras o lámparas de calefacción que, de manera similar a las estufas, pueden ser de alta eficiencia térmica cuando el biogás que les sirve de combustible presenta una presión intermedia (mayor a 15 mbar y unos 15 cm de columna de agua) y que permiten el uso del sistema Venturi, que hace una mezcla ideal de aire y biogás con criadoras de biogás o lámparas de propano modificadas de manera adecuada. Alternativamente se utilizan unidades artesanales como la que se presenta en la ilustración 50, que irradian el calor por ondas. Según un estudio (Viquez 2015), cada criadora puede consumir cerca de 0.3 m³/h de biogás, dependiendo de su tamaño y capacidad.

Ilustración 50. Ejemplo de criadoras de biogás utilizadas en la calefacción de lechones



Fuente: De izquierda a derecha: unidad artesanal criadora, modificada de propano a biogás, y criadora de biogás en una granja de cerdos en Costa Rica.

Asimismo, el biogás se puede emplear en la iluminación, para lo cual la flama producida por su combustión debe generar una alta temperatura, lo que se logra con una buena mezcla de aire, además de combustible con una presión mayor a 15 mbar. Dicha flama, que es azulada y estable, calienta una manta de nailon, impregnada con metales incandescentes (cerio y torio) que reaccionan a altas temperaturas, la cual, expuesta al calor, genera luz (ilustración 51).

En Latinoamérica la utilización del biogás en la iluminación no ha tenido tanto auge, pues es indispensable que esté presente una presión intermedia estable (mayor a 15 mbar), lo que se logra únicamente con biodigestores de cúpula fija o flotante. Esta presión se puede incrementar a través de un equipo eléctrico (p. ej., una turbina); no obstante, este es alimentado con energía eléctrica.

Ilustración 51. Ejemplos de lámparas de biogás utilizadas en Nicaragua y Cuba

3.1.5 Calentadores de agua

La calefacción de agua con biogás para usos productivos, como la desinfección de equipos de ordeño y la preparación de alimentos, se ha implementado en el pasado con buenos resultados. Esto se ha logrado mediante unidades rudimentarias, p. ej., una olla sentada sobre un quemador semiindustrial (ilustración 52) o calentadores de paso o de acumulación (calderas).

Ilustración 52. Calefacción de agua para la limpieza de equipos de producción de leche en Costa Rica.

El calentador de paso (calefón) es una tecnología interesante, pues el equipo se enciende semiautomáticamente en el momento en que empieza a circular el agua. Su funcionamiento es sencillo: el biogás se quema, generando una llama, y cuando el agua fluye por medio de un serpentín/intercambiador de calor, esta se calienta. Presenta una eficiencia térmica alta (>80 %), que logra llevar el agua de la temperatura ambiente hasta los 55 °C (temperatura estándar para comparar calentadores de paso).

Al igual que ciertas estufas y criadoras, existen equipos que ya funcionan con biogás o que se pueden modificar fácilmente para ello, p. ej., ampliando el diámetro del inyector (ilustración 53).

Estos calentadores presentan diferentes capacidades, p. ej., 6, 14 o 20 l, lo cual indica el volumen/min de agua que el equipo puede calentar, con un incremento estable de 20 °C, es

decir, un equipo de 6 l tiene la capacidad de calentar 6 l de agua/min, llevándola de 30 °C a 50 °C de forma estable.

En la ilustración 54 se muestra un equipo de este tipo instalado en una lechería en Costa Rica. El consumo de biogás de este tipo de calentadores dependerá de su tamaño, pero oscila entre 0.3 y 1.2 m³/h en calentadores de 7 l/min, entre 1 y 2.5 m³/h en calentadores de 12 l/min y entre 1.5 y 3 m³/h en calentadores de 16 l/min.

Ilustración 53. a) Diferencia entre el diámetro de inyección de combustible de un equipo de gas propano (GLP) y el de otro equipo de biogás similar y b) aumento del diámetro de inyección, empleando un taladro.

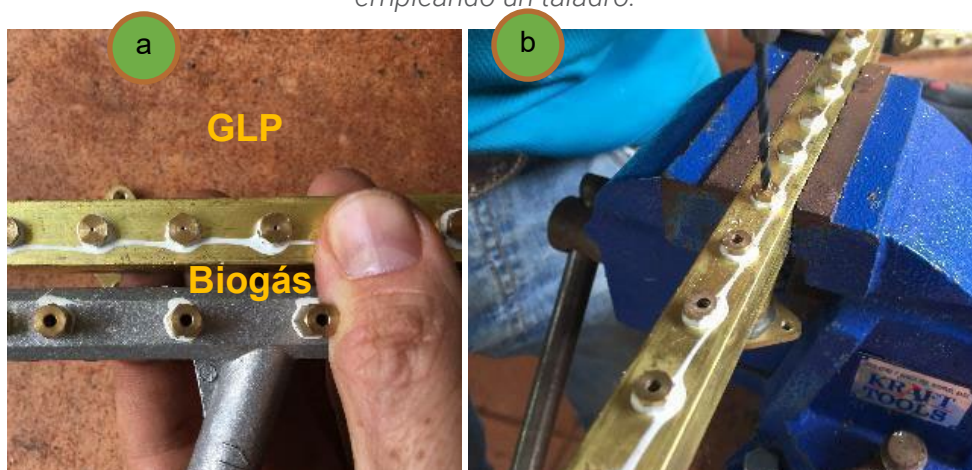


Ilustración 54. Calentador de paso (calefón)



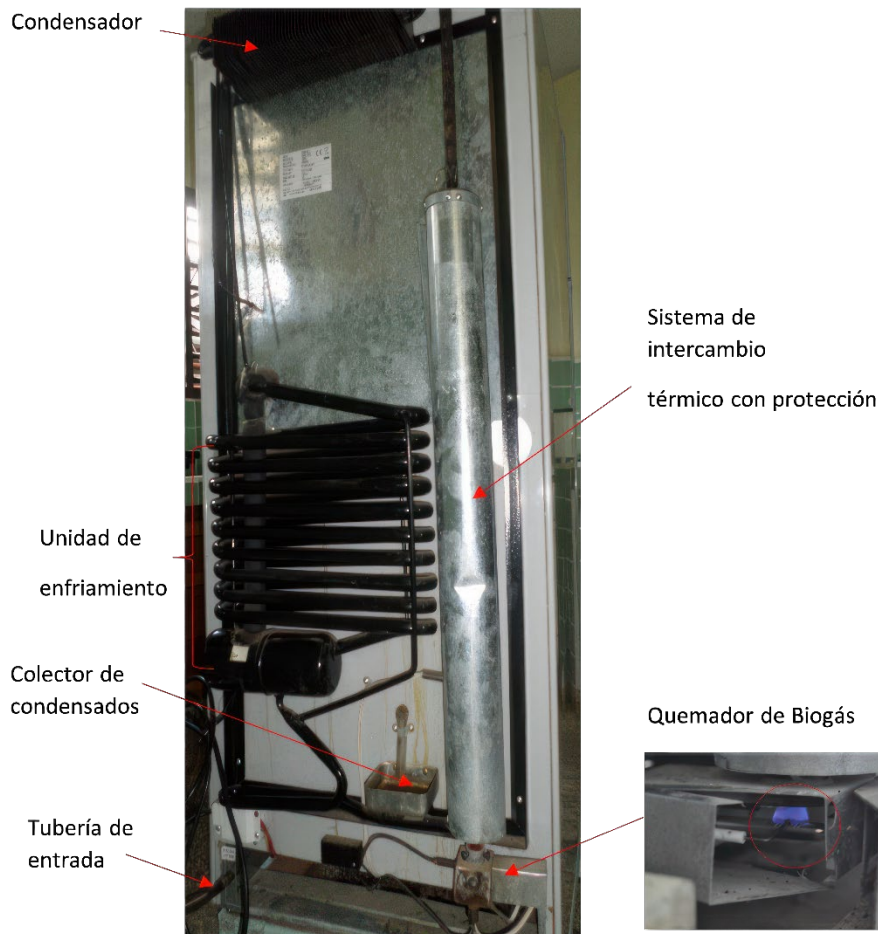
Nota: Izquierda: en Costa Rica, calentadores empleados en la limpieza de equipos en una finca lechera (el equipo de la izquierda opera con biogás y, como respaldo, otro equipo, que funciona con propano). Derecha: en Cuba, adaptación de un calentador eléctrico para su uso con biogás.

3.1.6 Enfriamiento con biogás

Para utilizar el biogás en un proceso de enfriamiento se requiere una fuente de calor en el intercambiador (p. ej., una llama de biogás), a través de la cual ocurre la separación de los diferentes gases que llevan a cabo el proceso de refrigeración. Los elementos químicos que suelen intervenir en el proceso de refrigeración por absorción-difusión son el amoníaco, el hidrógeno y el agua. Si estos son mezclados a determinada presión con un agente externo

(energía térmica), realizan la función del ciclo continuo de refrigeración. Estos equipos cuentan fundamentalmente con un sistema de entrada de biogás, un quemador, un intercambiador térmico y un sistema de absorción compuesto por un condensador y una unidad de enfriamiento (como se aprecia en la ilustración 55), es decir, presentan las mismas prestaciones de un refrigerador convencional eléctrico.

Ilustración 55. Componentes fundamentales del refrigerador de biogás de absorción-difusión



En Cuba la refrigeración de absorción-difusión se ha implementado y utilizado en tres períodos particulares:

- En la década de los 70, en el Input, ubicado en la provincia central de Las Villas, se ensamblaban refrigeradores de luz brillante, que fueron adaptados para el uso de biogás y se distribuyeron en zonas no electrificadas y de difícil acceso, denominadas zonas del plan turquino.
- Recientemente, entre 2008-2020, mediante diversos proyectos internacionales como Biomasa Cuba y Agroenergía y Bioenergía, entre otros, se han introducido de forma exploratoria algunos prototipos (ilustración 56) para evaluar su comportamiento en las condiciones ambientales del clima tropical, sobre todo en el medio rural.
- Entre 2021 y 2030, de forma coincidente con la finalización de la evaluación de los 17 ODS de la ONU, se retomaría en Cuba la fabricación de los refrigeradores modernos de absorción. En esta última etapa, que ya se encuentra en proceso, se han ido creando las condiciones en la misma fábrica correspondiente al primer período.

Ilustración 56. Prototipos de refrigeradores de biogás en escenarios rurales de Cuba



Los refrigeradores tienen dos compartimentos: uno de refrigeración y otro de congelación, con un volumen de entre 185 y 200 l y de entre 45 y 50 l, respectivamente. La presión del biogás requerida en el quemador debe ser de entre 25 y 30 mbar, con un consumo que va desde 1 a 1.5 m³ de biogás/día, en función del equipo y las necesidades de conservación de alimentos de la vivienda.

Durante la instalación y adaptación de estos equipos se presentaron los siguientes problemas:

- i. Los refrigeradores están fabricados para funcionar con gas propano, por lo que se requiere su modificación, en muchos casos, incrementando el diámetro de las boquillas entre 1 y 3 mm para que la cantidad de biogás que ingresa en el quemador se equipare al poder calorífico del gas propano, según el diseño del fabricante; no obstante, la calidad del biogás puede cambiar en cada finca, por lo que se requiere un ajuste.
- ii. Las *presiones de trabajo* de los refrigeradores deben mantenerse *entre 22 y 30 mbar*, según cada fabricante, para evitar el apagado del quemador (el cierre de la válvula de corte, debido al cual el refrigerador deja de operar). Si esto ocurre, se debe volver a encender manualmente. Generalmente, *es difícil mantener la presión de trabajo del biogás dentro de ese rango*, sobre todo en aquellas plantas de biogás familiares que emplean como tecnología biodigestores de cúpulas fijas o biodigestores tubulares que trabajan con presiones superiores o inferiores y que varían constantemente según la cantidad de biogás acumulado. Para solucionar este problema se inserta una bala (cilíndrica o esférica) en la línea de entrada del biogás, que funciona como amortiguador, con una válvula de entrada y salida que, de forma manual, permite regular la cantidad y la presión del biogás que entra en el quemador.
- iii. Los refrigeradores de absorción-difusión presentan una *abertura que no resulta funcional cuando se utiliza el biogás*, dado que están diseñados para emplear gas propano. Por tal motivo, es recomendable cerrar la escotilla o abertura que permite la entrada de aire antes de la boquilla, ya que las entradas de aire de otras aberturas del área del quemador son suficientes.
- iv. *Las entradas de aire del exterior al quemador pueden apagarlo*, por lo que se recomienda sellarlas con algún material aislante resistente a las altas temperaturas, como cinta aislante de aluminio, principalmente las entradas laterales, incluida la de encender el

quemador, de tal forma que se pueda retirar y colocar a la hora de encenderlo. Solo se quedan sin sellar las entradas de la parte inferior del quemador.

3.1.7 Deshidratador

En varios países de Latinoamérica el biogás se ha utilizado también en procesos de secado. En Paraguay se instaló un deshidratador de acero inoxidable, tipo armario, con un colector solar inclinado. Aunque el sistema de conducción de calor es complejo, resulta útil para el secado de todo tipo de productos alimenticios, en especial, aquellos que necesitan mantener su calidad organoléptica y proteger sus propiedades naturales. A este deshidratador solar se le agregó otro compartimiento (en la zona del colector) con un quemador que funciona con biogás. Este quemador no se encuentra en contacto directo con el aire que circula dentro del deshidratador (ilustración 57).

Ilustración 57. Quemador de biogás para la generación de calor en un deshidratador de alimentos en Paraguay

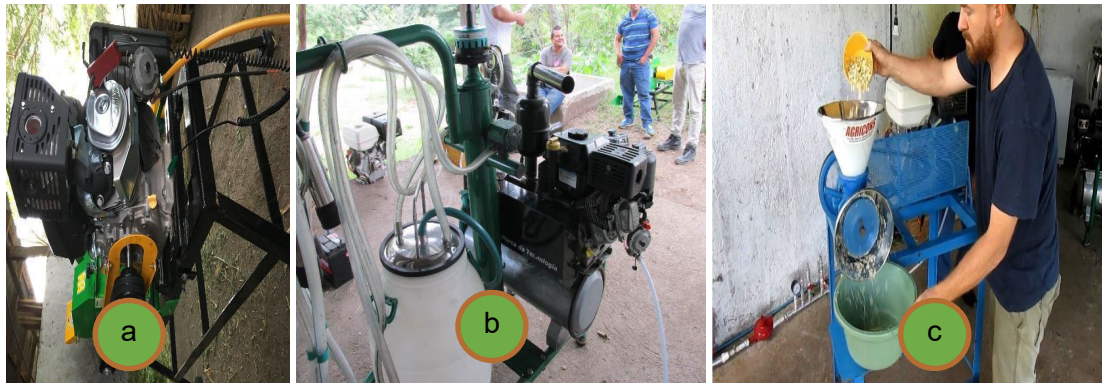


Dentro del secador solar se encuentran superpuestas varias bandejas removibles de secado con base de tejido. El colector está cubierto con vidrio y tiene en su interior una chapa de color negro. Posee un extractor eléctrico de aire en la parte superior de la cámara, para garantizar una buena circulación del aire.

La capacidad de los deshidratadores que utilizan biogás para el secado de los alimentos depende del tipo de producto por secar; p. ej., si se trata de especies vegetales de hoja, se logra un secado completo en cinco horas aproximadamente, con una capacidad de convertir 10 kg de producto fresco en 6 kg de producto seco y un consumo aproximado de 1 m³ de biogás.

3.1.8 Usos mecánicos del biogás

El biogás se emplea también para accionar motores de combustión interna, capaces de mover una variedad de equipos, entre ellos, picadoras de pasto, bombas de vacío de unidades de ordeño, molinos, molidoras de granos y bombas de agua. Ello se logra por medio de poleas, de la misma forma que se haría con un motor eléctrico. En la ilustración 58 se presentan algunos ejemplos de aplicaciones mecánicas que utilizan el biogás como combustible. Los usos eléctricos se diferencian de los mecánicos en que el motor de combustión acciona un generador de electricidad, destinado al funcionamiento de una variedad de equipos.

Ilustración 58. Ejemplos de diferentes aplicaciones de motores de biogás

Nota: : a) picadora de pasto, b) sistema de ordeño y c) molino de maíz.

Fuente: Tomado de SNV 2017:7

Se suele pensar que el biogás se aprovecha de forma óptima en la generación eléctrica o en un motor; sin embargo, su utilización en aplicaciones eléctricas y mecánicas es más compleja, ya que el motor de combustión requiere modificaciones.

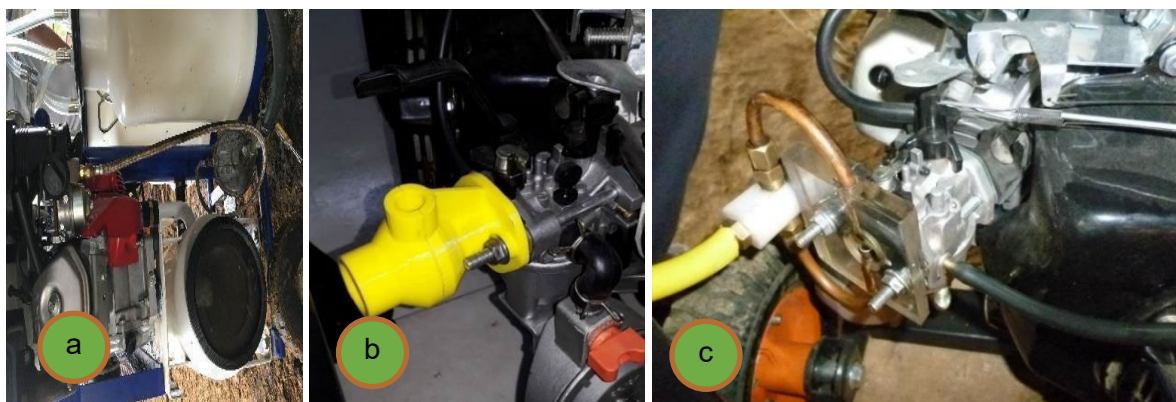
La modificación más sencilla de estos motores consiste en cambiar el sistema de carburación, pues es allí por donde ingresa el combustible mezclado con el aire en el motor. En la ilustración 59 se presenta el cambio de un carburador de gasolina por uno de gas, que se consigue fácilmente en el mercado (ilustración 60).

Ilustración 59. Pasos para cambiar un sistema de carburación de gasolina por uno de carburación de gas en un motor Briggs & Stratton de 6.5 HP, empleado en un equipo de ordeño



Fuente: Tomado de SNV 2017:9

Ilustración 60. Otros ejemplos de adaptaciones de un motor para que funcione con biogás



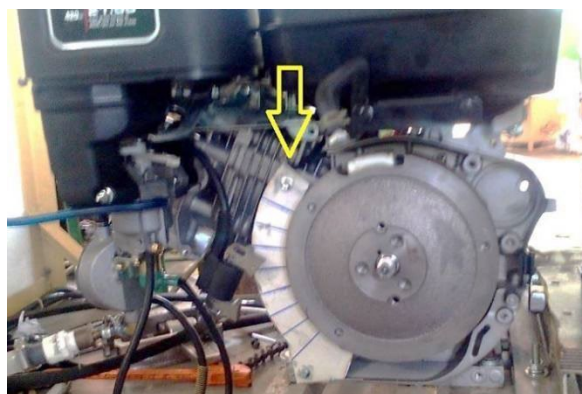
Notas: a) con un *flanger* de admisión, b) con una unidad de vacío desarrollada con impresión 3D y c) con una unidad de vacío experimental.

Fuente: Tomado de von Mitzlaff 1988:14, Patiño y Chacón 2017:15 y SNV 2017:11

Al igual que las estufas, para funcionar adecuadamente los motores requieren una relación ideal biogás-aire. Además, el ingreso del biogás en el motor debe ser regulado automáticamente, a fin de que este reciba una mayor cantidad de biogás cuando requiera más fuerza. Para lograr esto, se debe instalar un **regulador de demanda**, como el que se muestra en la ilustración 62 a.

Otra modificación más avanzada consiste en ajustar el tiempo de la chispa. Un encendido prematuro o atrasado de la chispa reduce la potencia del motor. Este tiempo guarda relación con la velocidad de inflamabilidad del biogás y depende de factores como la velocidad del motor, la potencia, la presión y la temperatura, entre otros (von Mitzlaff 1988). En la ilustración 61 se presenta un ejemplo de este tipo de modificación.

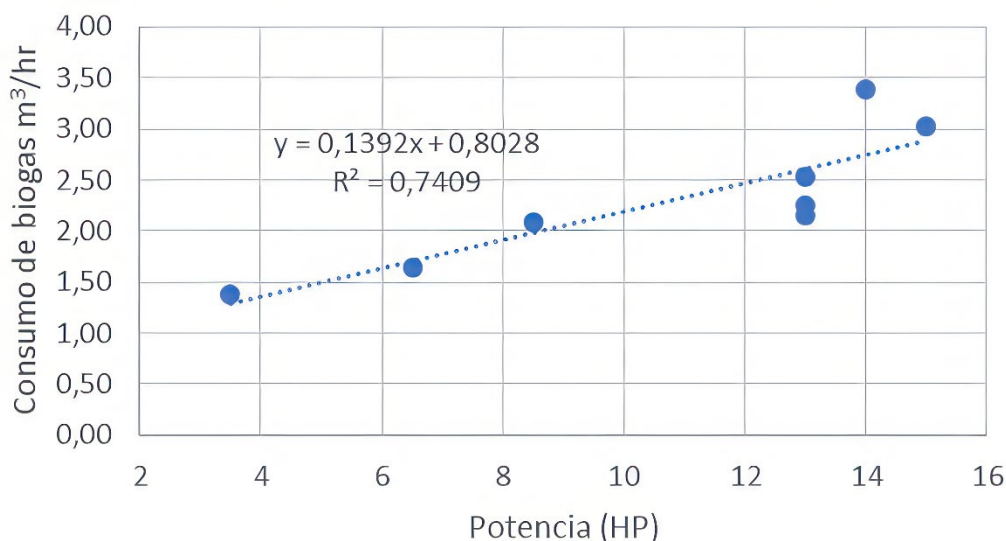
Ilustración 61. Ejemplo de modificación del tiempo de encendido de la chispa



Fuente: Tomado de Núñez 2017:17

La cantidad de biogás que consume un motor dependerá de las revoluciones a las que este opere y de su potencia (o tamaño). De acuerdo con una evaluación realizada por la Organización de los Países Bajos para el Desarrollo (SNV 2017), se produjo un consumo de biogás de entre 1.5 m³/h y 3.5 m³/h en motores monocilíndricos que operan con una potencia de 4 a 15 HP. En el gráfico 12 se ofrece una relación entre la potencia del motor y el consumo de biogás a 1300 revoluciones.

Gráfico 12. Consumo de biogás según la potencia del motor



Fuente: Tomado de SNV 2017:17

Los motores de combustión tradicionales convertidos a biogás pueden presentar pérdidas de potencia debido a los siguientes factores:

1. La variabilidad del potencial calórico del combustible (p. ej., de gasolina a biogás);
2. La ubicación del motor (la altura sobre el nivel del mar a la que operará el equipo), dado que se dispondrá de menor o mayor cantidad de oxígeno atmosférico;
3. La interrupción de la operación por una disminución en las revoluciones; y
4. La imposibilidad de que los equipos operen con el 100 % de su potencial.

Por tanto, se deben considerar estos cuatro factores para escoger el tamaño del motor, así como aumentar las dimensiones del motor requerido para que funcione con biogás.

3.1.9 Generación eléctrica

El biogás genera energía eléctrica a través de un motor que acciona un generador eléctrico. Para convertir el biogás en electricidad deben ocurrir entre tres y cuatro conversiones energéticas:

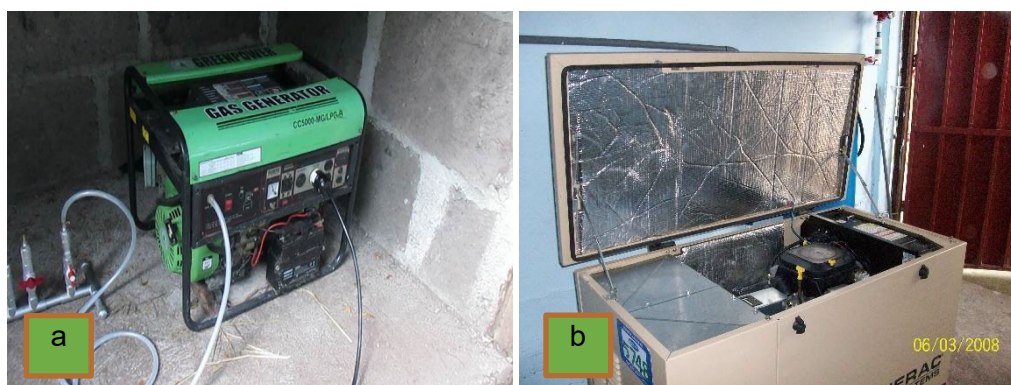
- 1) La energía química del CH_4 se transforma en energía cinética en el motor de combustión.
- 2) Luego se convierte nuevamente en energía eléctrica cuando sale del generador.
- 3) Posteriormente se transforma de nuevo en energía cinética al accionar, p. ej., un motor eléctrico.

Es por esta razón que los generadores eléctricos que funcionan con la energía del biogás o algún otro combustible se consideran de “baja eficiencia”.

Adicionalmente, la eficiencia de un generador eléctrico se ve influenciada por la potencia o el tamaño del equipo y la carga con que trabaja. En otras palabras, cuanto más pequeño sea el generador, menor será su eficiencia y cuanto más cercano esté a su máxima capacidad o potencia, mayor será esta eficiencia. Por tanto, dimensionar adecuadamente el equipo resulta clave.

El consumo de biogás de un generador eléctrico depende de la eficiencia eléctrica con la que esté operando (usualmente desconocida) y la potencia con la que está trabajando (no siempre una respuesta intuitiva). En la ilustración 62 se presentan imágenes de generadores de varios tamaños aplicados en diferentes escalas y proyectos en Costa Rica y Nicaragua.

Ilustración 62. Ejemplos de aplicación de biogás en generadores eléctricos de varias escalas





Notas: a) generador GreenPower de 3.5 kW en Managua, Nicaragua, b) generador Generac de 20 kW en San Carlos, Costa Rica, c) generador Generac de 60 kW en Guanacaste, Costa Rica y d) generador 2G de 200 kW en Cartago, Costa Rica.

Fuente: Tomado de SNV 2017: 11

3.1.10 Biogás comunitario: uso de minirredes para la distribución y el uso del biogás

En toda la región de ALC una gran cantidad de comunidades rurales alejadas de centros urbanos enfrentan dificultades de acceso a la energía y problemas de contaminación causados por la producción agropecuaria periurbana. Pese a ello, la producción de biogás en biodigestores comunitarios no es una práctica muy extendida en la región y la distribución de biogás para uso doméstico en redes rurales de distribución es aún menos frecuente.

La generación y la distribución de biogás en pequeñas comunidades mediante modelos de trabajo asociativos podrían ser cruciales para el desarrollo rural energético, incluso en sistemas de generación de energía que se distribuye a productores rurales con posibilidad de generar biogás en escala económicamente inviable o a actores de la agricultura familiar.

A diferencia de otras formas de energía renovable, la producción de biogás es una tecnología que debe estar profundamente inserta en las instituciones rurales (el sector agropecuario y estructuras y políticas relacionadas) y en las prácticas sociales. Esta no depende solo de sustancias materiales, sino también de la estructura institucional y de las prácticas de los productores rurales involucrados. Debido a esto, a los sistemas comunitarios de producción de biogás se les puede considerar como organizaciones sociales, es decir, una coordinación de actores y materiales (p. ej., materia orgánica) amparada por ciertas normas o reglas (estructura institucional), con el fin de producir biogás (Bluemling *et al.* 2013). En consecuencia, la producción rural de biogás se entenderá como un sistema socio-técnico mantenido por la organización de los diversos actores y materiales involucrados.

Tanto la producción como la utilización de biogás como fuente de energía renovable han sido exploradas en esquemas de trabajo asociativo. Para ello, se han planteado diferentes opciones, principalmente:

1. Varios biodigestores independientes interconectados por medio de gasoductos rurales que forman conjuntos de redes interconectadas con gestión asociativa y
2. Un biodigestor central que procesa la producción de múltiples fincas. Algunos de los desafíos que estas instalaciones suponen son de tipo técnico (costos de instalación

y garantía de ininterrupción), además de aspectos normativos (instalación de redes en el ámbito público y su regulación) y actitudinales, relacionados con sistemas multiusuarios autogestionados.

En esta sección se explora el estado actual de tres proyectos de desarrollo de biodigestores comunitarios y minirredes de distribución de biogás en el ámbito rural.

3.1.11 Condominio de agroenergía en Ajuricaba, municipio de Marechal Cândido Rondon, estado de Paraná, Brasil

El Condominio de Agroenergía para la Agricultura Familiar, que abarca 33 propiedades, fue instalado en una microcuenca hidrográfica de entre 10 y 20 ha. Su ubicación facilita la adopción de prácticas sanitarias y de conservación para reducir la contaminación hídrica y atmosférica.

Este condominio de agroenergía está conformado por planteles de pequeños productores rurales de soja, maíz, trigo, leche, carne de cerdo y aves, quienes de manera individual no alcanzan la escala de uso de los residuos y desechos de sus animales para producir energía con biogás. Cada una de las 33 propiedades cuenta con biodigestores individuales que producen, en conjunto, un caudal promedio diario de efluentes de 48.43 m³ (16 000 t/año), con una generación aproximada a los 266 000 m³/año de biogás.

El biofertilizante obtenido es de alta calidad y se aplica en pastos y otros cultivos agrícolas para incrementar la productividad, reducir los costos de producción y aumentar aún más el grado de sostenibilidad del sistema productivo.

En algunas de las propiedades se consume parte de la energía térmica del biogás en estufas para cocinar los alimentos (en lugar de GLP), lo que genera comodidad, higiene, calidad y mayor productividad en las actividades diarias. Además, se usa para calentar el agua destinada a la limpieza de los utensilios del tambo (lechería), con el objetivo de mejorar la calidad de la leche y, por lo tanto, los ingresos generados por su venta. El excedente se transporta por un gasoducto de 25.5 km hasta una microcentral termoeléctrica, donde el biogás se puede convertir en energía eléctrica, térmica o vehicular. Su aprovechamiento en energía eléctrica se realiza a través de un motogenerador de 100 kVA, con conexión de generación distribuida, es decir, la energía se genera cerca de donde se produce la demanda y se utiliza para el autoconsumo y la compensación del excedente.

Asimismo, el biogás alimenta un horno, como fuente de calor indirecto en la secadora de granos, que es utilizado por los productores del condominio, reduciendo hasta en 90 % el costo del secado de los granos. En lo que respecta al aprovechamiento en forma de energía vehicular, se han realizado investigaciones sobre la conversión del biogás en biometano, para el desarrollo de un vehículo de transporte rural.

Entre los resultados alcanzados por la unidad se destacan: 1) el aumento de la producción agrícola; 2) la diversificación productiva; 3) la mejora de la calidad de vida en las propiedades, debido a la eliminación de olores e insectos; 4) la seguridad energética; 5) la conservación del suelo y el agua; 6) la reducción del éxodo rural; 7) la ampliación de las oportunidades en la agricultura familiar; 8) la reducción de los costos de producción; y 9) la generación de ingresos adicionales.

En los últimos años el Condominio Ajuricaba se ha deteriorado, ya que a la fecha menos de diez familias mantienen los biodigestores en funcionamiento, mientras que el biogás generado se consume solo en las propiedades. Desde hace casi dos años esta disminución de familias provocó el cese del funcionamiento del Centro de Operaciones de Biogás.

Uno de los motivos es que, al inicio del proyecto, se había prometido a los participantes que podrían vender el exceso de energía, lo que proporcionaría un retorno financiero directo a los productores; no obstante, años después, con el cambio de legislación, esto ya no fue posible y el sistema se convirtió en una forma de compensación, es decir, la energía generada se convirtió en créditos para los agricultores. Otra de las razones del descenso en la producción de biogás en la Línea Ajuricaba fue la terminación del convenio con el Centro Internacional de Energías Renovables-Biogás (CIBiogás), que ofreció todo el apoyo técnico a los productores. De esta manera, los productores por sí solos no pudieron efectuar el mantenimiento necesario en los equipos (ilustración 63).

Ilustración 63. Proyecto Ajuricaba



Cabe señalar que actualmente no existen especificaciones técnicas ni regulaciones para gasoductos rurales en Brasil, por lo que el biogás y sus posibilidades de microgeneración no son considerados por la ANP ni por Petróleo Brasileño S. A., que se encargan de los procesos de generación, transporte y distribución de gas.

3.1.12 Minirredes en Cuba

En Cuba, desde los primeros años del siglo XXI, se ha intensificado el establecimiento de grupos de pequeñas redes de distribución de biogás familiares o vecinales, construidas con recursos y proyectos locales, aprovechando las bondades de las plantas de biogás en funcionamiento en comunidades rurales. En la mayoría de los casos estas emplean como modelo el **biodigestor de cúpula fija**, que **no necesita compresores ni sopladores para la compresión y el impulso del gas**, pues se aprovecha la presión generada por las columnas de agua en el biodigestor para la compensación de las presiones. Los volúmenes de digestión de estas pequeñas plantas de biogás se encuentran entre los 8 y los 50 m³, aunque en algunos casos alcanzan incluso los 95 m³.

El biogás producido se limpia con uno o varios filtros, cuyo material filtrante es la limalla de hierro, el carbón vegetal o una combinación de ambos. La mayoría de los filtros tiene un volumen de 0.1 a 0.2 m³ y presenta de 5 a 25 kg de limalla de hierro como material filtrante. El

biogás distribuido se contabiliza por caudalímetro o flujómetro en la salida del biodigestor después del proceso de filtrado y en algunas de las viviendas beneficiadas se dispone de contadores de biogás.

Las conductoras de biogás generalmente emplean tubos de PVC o PEAD o mangueras de esos mismos materiales con diámetros desde $\frac{3}{4}$ de pulgada hasta $1\frac{1}{2}$ pulgadas. En el terminal de la red disminuyen el diámetro a $\frac{1}{2}$ pulgada para suministrar el biogás a las viviendas. Con el uso de estas redes se benefician de 3 a 5 viviendas y el biogás que circula por ellas se emplea esencialmente en la cocción de alimentos y, en algunos casos, en calentadores de agua, refrigeradores de absorción y lámparas. Un ejemplo de ello se encuentra en el municipio Ranchuelo, en la provincia Villa Clara, como se observa en la ilustración 64.

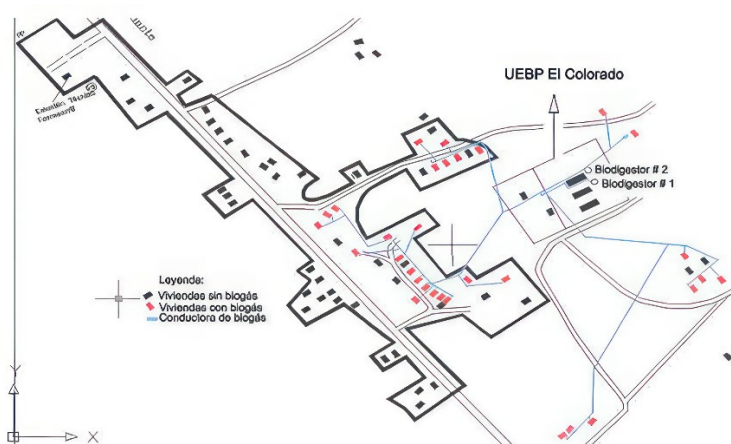
Ilustración 64. Cocina, biodigestor, conductor y lámpara de biogás en el motel Las Tecas, municipio Ranchuelo, provincia de Villa Clara, Cuba



Estas redes no se construyen según una línea predeterminada, sino teniendo en cuenta la ubicación de los asentamientos rurales, la ubicación de los biodigestores que las alimentan, así como la distribución de las viviendas que reciben el servicio; sin embargo, para su construcción se deben cumplir determinadas reglas y tener en cuenta las condiciones del terreno y la ubicación de los puntos más bajos para colocar los sistemas de evacuación de condensados (puntos de purga), evitando así su acumulación para no interrumpir la circulación del gas.

En el municipio de Cabaiguán, de la provincia de Santi Spíritus, se destaca la construcción de redes locales de biogás con un nivel de servicio alto y exitoso (véase la ilustración 65). Además, existen cinco minirredes locales, con un mayor alcance, que fueron facilitadas por el Proyecto Biomasa Cuba, financiado por la COSUDE y ejecutado por la EEPFIH.

Ilustración 65. Red de distribución de biogás en la comunidad rural El Colorado, en el municipio de Cabaiguán, provincia de Santi Spíritus.



Fuente: Tomado de López Savran 2018: 11

Estas redes distribuyen el biogás a una distancia de aproximadamente 3 km, sin sopladores ni compresores, es decir, solo con la presión de los biodigestores de cúpula fija que se encuentran en los rangos de 170 a 190 mbar, logrando el desplazamiento del biogás hasta los diferentes puntos de servicios. Con estas cinco redes se benefician alrededor de 112 viviendas rurales, que han logrado una reducción del consumo de energía eléctrica de entre 40 y 60 %, gracias a la utilización del biogás en la cocina. El consumo promedio de biogás/vivienda es de 1.5 a 1.7 m³ por día. En la tabla 21 se muestran las redes de biogás en Cabaiguán, Santi Spíritus.

Tabla 21. Redes de biogás en Cabaiguán, Santi Spíritus

Comunidad	El Colorado	Ojo de Agua	Juan González	La Macuca	Pozas
N.º de biodigestores	2	1	8	2	1
Volumen total (m ³)	165	29	165	60	40
Dimensión de la red (km)	2.9	1.4	1.22	1.4	2.3
Cantidad de viviendas beneficiadas	42	12	28	20	10
Ramales	3	2	9	6	4
Uso de biogás	Cocción	Cocción	Cocción	Cocción	Cocción
	Refrigeración				
	Iluminación				
Año de construcción	2013	2014	2015	2015	2021

3.1.1.3 Producción de biogás en Los Pinos, municipio de Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina

En esta localidad se lleva a cabo la construcción de una unidad demostrativa de producción de biogás (ilustración 66). Este proyecto tiene como objetivo distribuir biogás directamente para uso doméstico. Con una producción estimada de 60 m³ se pretende abastecer de biogás a unas 10 viviendas rurales. Un único biodigestor se alimenta de una mezcla de guano de gallinas ponedoras, efluente de la cría de cerdos y residuos de una agroindustria que procesa papas. La provisión de diferentes sustratos se realiza mediante acuerdos firmados con los productores ubicados cerca de la instalación. Luego de su acondicionamiento, el biogás será distribuido a los hogares próximos a la unidad por medio de una red de distribución independiente. Además de los desafíos técnicos y normativos que supone una tecnología incipiente en el país, son necesarios esfuerzos para lograr que la comunidad anteponga los objetivos comunes a los personales, en un grupo heterogéneo en cuanto a sus intereses, idiosincrasia y educación. Para ello, el proyecto avanza en un marco de alianzas socio-técnicas entre diferentes actores de los ámbitos público (de investigación y desarrollo (I+D), municipal y universitario) y privado (vecinos y empresas). Un equipo técnico trabaja en la instalación de la unidad, velando por su sostenibilidad operativa (permanencia en el tiempo), mientras que, para lograr la sostenibilidad institucional del proyecto, entendida como “La adopción de un nuevo sistema en un sistema sociopolítico y cultural preexistente y la continua mejora de su performance” (Spaargaren *et al.* 2006), se constituyó una cooperativa de vecinos que será la encargada de administrar, operar y mantener la planta.

Ilustración 66. Biodigestor de Los Pinos



En la conformación de condominios de agroenergía y cooperativas la complejidad de las relaciones sociales demanda esfuerzos para la conciliación de los diversos intereses y las diferencias culturales. A pesar de los múltiples beneficios de la producción de biogás, la implementación de esquemas de producción comunitaria y de redes de distribución resulta viable solo si se establecen marcos regulatorios e instrumentos de promoción como políticas estatales (He *et al.* 2013). Para ello es indispensable el establecimiento de alianzas locales que ayuden a intermediar con los agentes comprometidos con el proceso y que son esenciales para la ejecución de las actividades y el éxito de los proyectos.

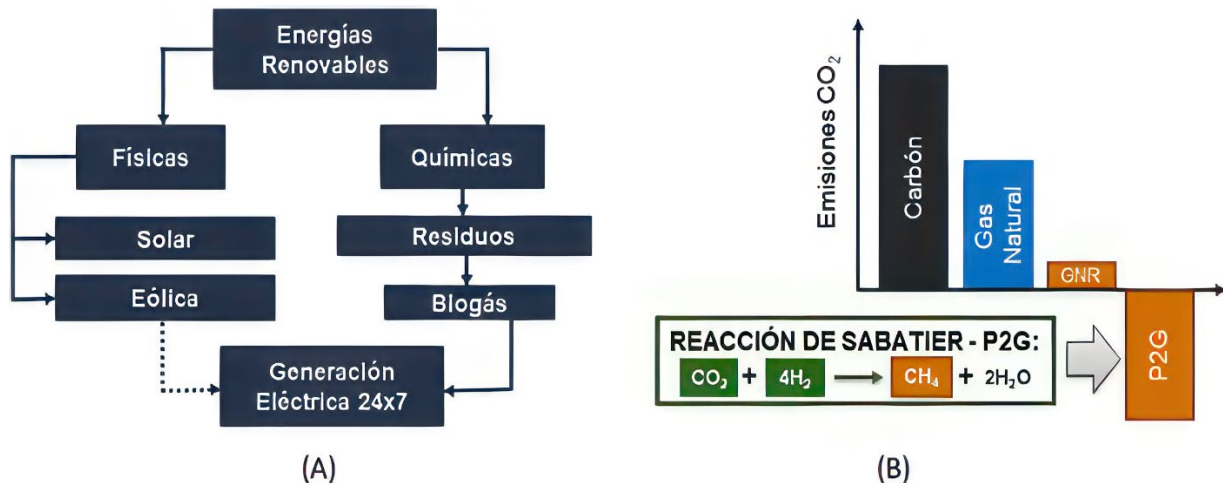
3.1.14 Nuevos conceptos del uso y la producción de biogás

El biogás es una fuente de energía renovable y sostenible que evita las emisiones de GEI. Al utilizar biomasa residual como sustrato en la obtención de biogás se impide la liberación de metano al ambiente, cuyo poder de retención de calor es 21 veces superior al del CO₂. En términos generales, el objetivo de este apartado es mostrar un proceso alternativo que busca la producción y purificación del biogás a biometano con el fin de obtener un sustituto sostenible del gas natural fósil y, en esta forma, colaborar con el cumplimiento del objetivo de la ONU de generar cero emisiones de GEI en el mundo en 2050. Estos procesos son aún motivo de investigación y desarrollo (Wulf *et al.* 2018).

En términos generales, el biogás contiene alrededor de 40 % de CO₂ y 60 % de metano; si este CO₂ reacciona con H₂, se obtiene 40 % más de biometano, equivalente al gas natural de origen fósil, conocido como gas natural renovable (GNR). En consecuencia, este GNR puede reemplazar a los combustibles fósiles en la generación de energía térmica, eléctrica y vehicular y, en esta forma, contribuir a descarbonizar el planeta. A esta vía para incrementar la eficiencia en la generación de metano se le conoce como conversión de electricidad en gas (*power-to-gas*) (P2G).

La P2G es una forma de integración de energías renovables que aprovecha el CO₂ que contiene el biogás en la producción de más metano, utilizando hidrógeno verde a través de la reacción de Sabatier ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$). El hidrógeno verde se obtiene mediante la electrólisis del agua con energía eléctrica renovable (solar, eólica o hidráulica), debido a lo cual es un tipo de almacenamiento energético, al convertir la energía física en energía química (véase la ilustración 67). El CO₂ utilizado puede provenir también del aire atmosférico que se separa por medio de procesos de adsorción-desorción, utilizando carbón activado, tamices moleculares membranas microporosas.

Ilustración 67. Integración de energías renovables: (A) energías renovables físicas y químicas y (B) emisiones comparativas de CO₂



En la ilustración 67 (A) se muestra la integración de energías renovables físicas y químicas. Las energías físicas (como la solar y la eólica) son dispersas y de difícil almacenamiento, mientras que la energía química posee una mayor densidad energética, es almacenable en forma líquida gaseosa y actualmente se utiliza como combustible de transporte.

En la ilustración 67 (B) se muestran las emisiones de CO₂ de diferentes combustibles, utilizando la misma unidad energética. Si la base de la medida son 100 unidades de CO₂ emitido por el uso de gas natural, si se empleara carbón se emitirían alrededor de 180 unidades de CO₂, mientras que con el GNR se emitiría un valor cercano a cero unidades y con el biometano producido a partir de la P2G se evitaría la emisión de aproximadamente 40 unidades, es decir, que este GNR producido por P2G secuestra las unidades de CO₂, ayudando a la descarbonización del planeta (UHU 2019). Este sistema de captura y secuestro de CO₂ es conocido como captura, utilización y secuestro de carbono.

En la actualidad varias plantas comerciales de P2G están en funcionamiento. La primera planta piloto, de 25 kW, se construyó en 2009 en Stuttgart, Alemania, utilizando CO₂ proveniente de la atmósfera y con una eficiencia de generación de metano del 40 %. Una segunda planta piloto, también de 25 kW, fue construida en Rheinland-Pfalz, en ese mismo país, utilizando el CO₂ proveniente del biogás y el hidrógeno obtenido a partir de la electricidad de un parque eólico, cuya eficiencia fue del 60 %. En junio de 2013 se hicieron las primeras inyecciones de biometano a la red de gas natural. En 2018 en Europa existían 128 proyectos de investigación y demostración de P2G.

En 2015 se implementó un tercer método de P2G en la planta demostrativa de Allendorf (Eder), Alemania, a través del cual se obtiene metano por vía biológica, potencializando su producción mediante la inyección controlada de hidrógeno verde en la etapa de metanización. Los principales objetivos de la planta piloto fueron: probar el electrolizador en la producción de hidrógeno y la metanización biológica con respecto a la estabilidad a largo y corto plazos. En el ensayo se obtuvo un gas estable, que puede alimentar la red de gas natural, lo que demostró que el proceso es seguro, con diferentes calidades de CO₂ por ser suministrado al reactor de metanización (Viessmann 2015).

Aunque ya existen plantas industriales, los costos de estos procesos aún son altos, por lo que se continúan realizando trabajos de investigación para mejorar las condiciones de operación; no obstante, este proceso se ha generalizado y se empieza a aplicar en diversos lugares del mundo en el plano comercial.

En Latinoamérica, con la colaboración de la RedBioLAC, se puede implementar un proyecto piloto con biodigestores domésticos y un panel solar para la generación de hidrógeno verde. De obtenerse resultados positivos, como se espera, el GNR obtenido se puede utilizar en la cocción de alimentos, empleando estufas de gas natural sin modificación, y en la generación de electricidad en el campo, donde 1.6 m³ de GNR puede generar 1 kWh de energía eléctrica para uso doméstico.

3.1.15 Referencias bibliográficas

- Bluemling, B; Mol, A; Tu, Q. 2013. The social organization of agricultural biogas production and use. *Energy Policy* 63:10-17.
- Condomínio Ajuricaba de Biogás: o que deu errado? (en línea). 2021. O Presente Rural. Consultado 20 de nov. de 2023. Disponible en <https://opresenterural.com.br/condominio-ajuricaba-de-biogas-o-que-deu-errado/>.
- Caydiid, M; Adhiambo, P. 2017. Evaluation of thermal efficiency of cook stoves using biogas and LPG as energy resources. Proyecto de graduación, Costa Rica, Universidad EARTH.
- Guerrero, C; Pérez, A; Botero, R; Cerrato, M. s. f. Evaluación del uso de calentadores para lechones, operados con biogás a bajo costo. Costa Rica, Universidad EARTH.
- He, G; Bluemling, B; Mol, APJ; Zhang, L; Lu, Y. 2013. Comparing centralized and decentralized bio-energy systems in rural China (en línea). *Energy Policy* 63:34-43. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.019>.
- Lopez-Savran, A. S.-H. (2018). Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural en Cuba. *Pastos y Forrajes*, Vol 41 No 1. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942018000100010.
- Núñez, BM. 2017. Sistema de refrigeración de la leche a partir del biogás (en línea). *In Biogás: Creando Resiliencia al Cambio Climático y Mayor Productividad para la Cadena Láctea* (2017, Managua, Nicaragua). Presentación. Managua, Nicaragua, La Salle. 37 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://docplayer.es/80053980-Sistema-de-refrigeracion-de-la-leche-a-partir-del-biogas-ing-benito-m-nunez-coord-cidtea.html>.

- Patiño, F; Chacón, J. 2017. Adaptación y metodología para evaluar la conversión a biogás de motores de combustión interna: resultados preliminares. Buenos Aires, Argentina, RedBioLAC.
- Rincón, JM. 1 oct. 2020. Oportunidades de la biomasa y la bioenergía en un escenario post COVID-19, como catalizadores para una recuperación verde (en línea). *In* CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España). Alianzas estratégicas iberoamericanas en bioenergía: redes de biomasa y residuos, su rol en la sustentabilidad energética actual y oportunidades post-COVID-19 (en línea, foro virtual). Argentina. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://aacidcloud.aacid.es/index.php/s/Mq5zLSJJGeKLV3Y>.
- Rosado, J. 2018. Evaluación de la eficiencia térmica de dos conceptos de estufa usando biogás con baja presión. Proyecto de graduación. Costa Rica, Universidad EARTH.
- Ross, CC; Drake, TJ; Walsh, JL. 1996. Handbook of biogas utilization. Alabama, Estados Unidos de América, SERBEP.
- SNV (Organización de los Países Bajos para el Desarrollo). 2017. Informe de validaciones de 10 aplicaciones de biogás. Managua, Nicaragua, Programa Nacional de Biogás Nicaragua.
- Spaargaren, G; Oosterveer, P; van Buuren, JCL; Mol, APJ. 2006. Mixed modernities: towards viable urban environmental infrastructure development in East Africa. Países Bajos, Universidad de Wageningen.
- UHU (Universidad de Huelva, España). 2019. Power to gas: ¿Qué es power to gas? Conoce el P2G (en línea). La Rábida, España, WordPress. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://powertogasuho.wordpress.com/proyectos-y-plantas-existentes/>.
- Viessmann. 2015. Power-to-gas plant put into operation (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.viessmann.ae/en/the-press/Press-service/Presstext-09032015-08.html#:~:text=One interesting approach is the,electricity using electrolysis of water>.
- Viquez, J. 2015. Calefacción de lechones con biogás (en línea). UTN Informa al Sector Agropecuario 34(71). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://nebula.wsimg.com/379819339e95a49254263120f6ad5ae8?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1>.
- Viquez, J. 2019. Seminario ¿Cómo “duplicar la producción” de biogás a través de una estufa a biogás? (en línea, transmisión en vivo). San José, Costa Rica. 23 may. (Ciclo de Foros Técnicos Virtuales Gestión Sustentable de Residuos Orgánicos Agrícolas y Urbanos mediante la Innovación Tecnológica del Biodigestor). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=pUBFDVTbVb4>.
- von Mitzlaff, K. 1988. Engines for biogas. Eschborn, Alemania, GTZ.
- Walsh, JL; Ross, CC; Smith, MS; Harper, SR; Wilkins, AA. 1988. Biogas utilization handbook. Georgia, Estados Unidos de América, GTRI.
- Wulf, C; Linßen, J; Zapp, P. 2018. Review of power-to-gas projects in Europe (en línea). Energy Procedia 155:367-378. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.041>.

4

CAPÍTULO

CAPÍTULO 4

EJEMPLO DE USOS DE BIOLES EN PAÍSES SELECCIONADOS DE LATINOAMÉRICA³⁶

El uso del efluente del digester en escalas domésticas o familiares

Debido a la concepción generalizada de que el uso doméstico de los biodigestores se enfoca en su producción de energía, quienes desean implementar un proyecto de este tipo deben considerar la permanente producción de digestato para identificar tempranamente los factores de riesgo que podría suponer su manejo. Entre quienes ya se encuentran en los ámbitos de la agroecología, la permacultura o la producción de abonos propios, es fácil entender cómo se integra un biodigestor en el medio rural, donde se lleva a cabo la producción de frutas y hortalizas y/o el manejo de animales de traspatio. En este sentido, las reflexiones de los autores de este capítulo son las siguientes:

Se debe capacitar a los usuarios del biodigestor en el aprovechamiento del digestato con base en **muestreos habituales**. Ya que estos son difíciles de realizar en zonas aisladas o resultan **muy costosos**, para empezar a usar el biol en diferentes cultivos es recomendable efectuar pruebas de campo, diluyendo el digestato o aplicando pequeñas cantidades, a fin de que no se exceda el límite de nutrientes. Los efluentes de los biodigestores son muy diferentes en términos de sus composiciones de micro y macronutrientes, patógenos y materia orgánica, entre otros. Esto se debe a que contienen diversas mezclas de sustratos, trabajan a distintas temperaturas y están más o menos diluidos, según el tipo de biodigestor donde son producidos. Se recomienda comenzar con la aplicación de abono en los suelos antes de la siembra y, consecutivamente, abonar otros cultivos y árboles frutales de forma foliar. Ante el riesgo de la presencia de patógenos (*Escherichia coli*, salmonela y helmintos), es recomendable evitar el uso del biol en hortalizas de consumo fresco, sobre todo en momentos cercanos a su cosecha.

Se deben establecer espacios de apoyo a los pequeños productores agrícolas para conocer las características de los digestatos locales, compartir experiencias acerca de los cultivos típicos e identificar la **existencia de laboratorios** que puedan hacer análisis y muestreos de los sistemas más característicos de una zona para difundir esta información junto con **proyectos de desarrollo rural**. De esta forma, en los espacios mencionados se podrían implementar proyectos de **registro del uso** de digestatos en diversos cultivos, climas y suelos, así como las dosis utilizadas, ya que las condiciones edafoclimáticas (del suelo y del clima) harán cambiar las respuestas de los cultivos, lo que incentivaría su mayor aprovechamiento con fines agrícolas.

Lo ideal sería desarrollar proyectos de difusión de los biodigestores en zonas donde se lleva a cabo la producción de hortalizas y se ejecuten programas de agroecología, agricultura familiar y campesina y de cría de animales de traspatio, entre otros, a fin de que las familias valoraren

³⁶ Autores: José Carlos Aucancela, Gabriela Bonassa, Laura Mantilla, Alfredo Erlwein y Eliana Sotomayor.

no solo la disponibilidad de abonos para los suelos y cultivos, sino también el manejo del estiércol para la generación de biogás.

En estos proyectos o programas la asociatividad y la cooperación resultarían útiles, ya que podrían contribuir a canalizar la venta de productos orgánicos de estos pequeños productores, al mismo tiempo que intercambian el conocimiento adquirido y las experiencias prácticas sobre el uso del efluente con otras comunidades que puedan estar en transición hacia la producción orgánica. Los gobiernos autónomos, los municipios, las instituciones de desarrollo rural y las organizaciones de la sociedad civil en los territorios podrían ayudar a promocionar estos usos y establecer alianzas con las universidades para desarrollar un vínculo con los estudiantes, a fin de que atiendan las necesidades que un proyecto de biodigestores presenta sobre el terreno a lo largo de América Latina, considerando los diversos tipos de suelo, clima y pluviosidad.

Finalmente, **resulta clave incorporar el tema del digestato en la formulación de normas para impulsar su aprovechamiento con fines agrícolas**, dado que este ofrece soluciones descentralizadas y favorece el cuidado de los suelos locales cuando es bien utilizado; de lo contrario, podría contribuir a aumentar la contaminación de las masas de agua subterráneas y superficiales. En países donde recién se esté planificando la normativa del digestato, es recomendable no solo brindar los parámetros de valores mínimos o máximos, sino también pensar en una guía de mejores prácticas, dosis para diversos tipos de cultivos y momentos de aplicación, diluciones y modos de uso (fertirriego, acondicionador de suelos, etc.) en las diversas escalas en que se produce. Mientras no haya una norma al respecto, este se considera un residuo, lo que constituye un obstáculo para quienes muestran interés en este tipo de biotecnologías.

Uso del efluente del digestor en escalas productivas o industriales

En muchos países el efluente del biodigestor aún se considera un residuo, por lo que no se permite su comercialización como abono o fertilizante, lo que limita su aprovechamiento como parte del modelo de negocios de los sistemas agropecuarios, de la agroindustria y de quienes implementan un biodigestor con el fin de hacerse cargo de la gestión de sus residuos.

En Colombia, en términos de los parámetros de microorganismos y los índices de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) mínimos, los efluentes requerirían algún tratamiento extra (**maduración**) para poder disminuir la DQO antes de disponer de ellos, a fin de cumplir con los niveles requeridos para su uso como fertilizantes orgánicos.

En grandes sistemas de gestión de residuos resulta ambientalmente eficaz invertir en sistemas de remoción de nitrógeno o fósforo cuando no se va a utilizar el efluente como abono o fertilizante de suelos, cuando hay pocos cultivos o mucha lluvia o cuando hay riesgos de contaminación asociados al vertimiento. Para ello existen métodos de nitrificación/desnitrificación disponibles en el mercado y en la literatura académica, dirigidos a aplicar sistemas de maduración, estabilización o enfriamiento para conseguir que el digestato cumpla con estándares ambientales o agronómicos. Dado que gran parte de las investigaciones tiene lugar en los laboratorios, se requiere una implementación económica y técnicamente viable a gran escala. Además, en grandes generadores de digestato/biol es recomendable

considerar diversos métodos de gestión o tratamiento del digestato como su transformación a pélets y la uniformización de contenidos en micro y macronutrientes, para facilitar su uso y aplicación agrícola, ornamental o de mejoramiento de suelos degradados o erosionados.

En estos grandes generadores de efluentes ciertos valores deben ser medidos *in situ*, con el objetivo de conocer de manera regular las características del efluente. P. ej., en planteles ganaderos, donde la alimentación se realiza con alimentos concentrados, se tiende a obtener digestatos de alta conductividad eléctrica, por lo tanto, no se pueden utilizar en suelos salinos o cultivos sensibles. En general, en América Latina son pocos los laboratorios que realizan análisis de digestatos; por lo tanto, un equipo con enfoque agronómico y capaz de realizar análisis puede resultar crucial para el éxito de los proyectos. La escala industrial y la asociatividad ofrecen una nueva posibilidad de negocio, dado el volumen y las posibilidades de comercialización y uso.

4.1 Parámetros de calidad, casos de éxito, alternativas de aprovechamiento y normativa del biol

Autores: José Carlos Aucancela, Gabriela Bonassa y Laura Mantilla

4.1.1 Introducción

El biol o digestato, uno de los productos finales del proceso de DA, constituye una mezcla de biomasa microbiana y material no degradado durante la bioconversión (Guilayn *et al.* 2019), la cual permite reciclar y acondicionar los nutrientes del suelo. En varias encuestas aplicadas a numerosos agricultores estos manifestaron que valoraban los biodigestores por su capacidad de producir biol, un fertilizante líquido utilizable en los cultivos. Brindar acceso a los fertilizantes o reemplazar los sintéticos puede ayudar a disminuir los costos de producción y aumentar la productividad de los agricultores (Kennedy 2019).

4.1.2 Características de los bioles y últimos avances

4.1.2.1 Parámetros de calidad de los digeridos

En la actualidad el uso de los biodigestores ha ido en aumento, pero se han reportado pocos estudios a partir de los digeridos provenientes de estos a pequeña escala. La literatura relacionada con las características y el aprovechamiento de bioles en la agricultura es un poco limitada, lo que dificulta determinar su calidad.

4.1.2.2 Composición fisicoquímica

La composición fisicoquímica permite conocer la calidad de un biol en términos de humedad, materia orgánica, nutrientes y metales pesados, debido a lo cual una caracterización completa permite determinar el grado de toxicidad del biol para su disposición final, acondicionamiento o uso potencial como fertilizante o acondicionador de suelos.

Los parámetros fisicoquímicos de los bioles son principalmente pH, materia orgánica (DQO, SV y ST), nutrientes (N, P, K y micronutrientes) y elementos tóxicos (Cu, Ni, Cr y Hg, entre otros). De acuerdo con las publicaciones examinadas, alrededor de 80 bioles han sido caracterizados, siendo el pH, el nitrógeno total Kjeldahl (TKN), el nitrógeno amoniacal total (TAN), el fósforo (P) y el cobre (Cu) los más reportados.

Según la información suministrada en la literatura, el biol se puede agrupar en dos grupos según su rango de pH: el primero, de pH básico de entre 7.21 y 9.37, corresponde a bioles provenientes de estiércoles, residuos agroindustriales y de alimentos y aguas residuales de plantas de tratamiento y plantas de sacrificio animal. El segundo, de pH ácido de entre 5.64 y 7.35, corresponde a bioles de codigestión de estiércol bovino y glicerina (Albuquerque *et al.* 2012, Riva *et al.* 2016, Coelho *et al.* 2018).

En un biodigestor con un proceso de remoción de carga orgánica satisfactorio, la disminución de DQO generalmente está en un rango de 60 a 90 %. De acuerdo con la literatura, la DQO se halla entre 6000 y 11 650 mg/l en bioles de estiércol bovino, porcino y avícola, mientras que en la codigestión de aguas residuales y residuos agroindustriales (residuos de alimentos y cultivos energéticos) se alcanzan valores de DQO de hasta 100 300 mg/l. Los rangos de SV reportados son de 9.2 a 29.9 g/l en bioles de aguas residuales y estiércoles y de 23.9 a 63.7 g/l en la codigestión de residuos agroindustriales (residuos de alimentos y cultivos energéticos) (Tambone *et al.* 2010, Albuquerque *et al.* 2012, Coelho *et al.* 2018, Locoli *et al.* 2019).

Por último, en cuanto a nutrientes y metales, en la literatura los rangos encontrados en bioles provenientes de la digestión de estiércoles son de entre 2600 y 3979.7 mg de nitrógeno total Kjeldahl/l, 100 y 1980 mg P/l, 183 y 1580 mg K/l, 67 y 698 mg Mg/l, y 453 y 815 mg Ca/l (Castro *et al.* 2017, Chini *et al.* 2019, Hidalgo *et al.* 2019, Mortola *et al.* 2019). En el caso de bioles de otros residuos agroindustriales (desechos alimenticios, cultivos energéticos y aguas residuales), alcanzan concentraciones de 122 000 mg TKN/l, 32 800 mg P/l, 173 480 mg K/l, 24 266 mg Mg/l y 53 770 mg Ca/l (Tambone *et al.* 2010, Albuquerque *et al.* 2012, Riva *et al.* 2016, Coelho *et al.* 2018, Locoli *et al.* 2019). De lo anterior se evidencia que el sustrato afecta significativamente los parámetros de calidad del biol. En el caso del proceso de codigestión, la mezcla de sustratos alimentados permite obtener un mayor contenido de nutrientes y elementos menores.

4.1.2.3 Composición bioquímica

La caracterización en términos bioquímicos está representada por el potencial de biometanización residual (PBM residual) y la actividad metanogénica específica; sin embargo, de 80 bioles encontrados en la literatura, solo 2 suministran valores a las variables bioquímicas.

El PBM residual cuantifica la capacidad del biol para producir metano sin previa inoculación. En las publicaciones se encontraron valores de PBM residual de 0.04 y 0.048 Nm³ CH₄/kgSV para digeridos de estiércol bovino y codigestión de aguas residuales y estiércol bovino, respectivamente (Fotidis *et al.* 2016, Castro *et al.* 2017).

4.1.2.4 Composición microbiológica

La cuantificación de microorganismos patógenos permite evidenciar el riesgo biológico del digestato/biol. El proceso de DA alcanza generalmente una alta remoción de microorganismos patógenos; no obstante, entre los patógenos detectados en el biol se encuentran coliformes totales y fecales y *Salmonella* sp. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA 2016), un biol que tenga una densidad de coliformes fecales menor a 1000 NMP/gST, una densidad de *Salmonella* sp. menor a 3 NMP/4 gST y un contenido de

huevo de helmintos viable menor a 1 huevo/4 gST puede ser usado directamente en la agricultura sin riesgos para la salud humana. Según la literatura, en ninguno de los bioles encontrados se detecta la presencia de *Salmonella* sp, excepto en un biol proveniente de los desperdicios alimenticios de una industria láctea, que reportó 7 UFC/10g. En cuanto a la *Escherichia coli*, en el 45 % de los bioles reportados por Coelho *et al.* (2018) no se detecta el microorganismo, mientras que en el otro 55 % se halla en el rango de 8 a 23 UFC/g (Coelho *et al.* 2018).

4.1.3 Casos de aprovechamiento

4.1.3.1 Experiencias de las empresas ecuatorianas Inventagri y Terrabiol

Con el paso del tiempo se han roto paradigmas y se ha despejado la incertidumbre en general sobre el uso de los biodigestores. El biol, un subproducto de la biodigestión, presenta notables características para su uso en la agricultura convencional, agroecológica y orgánica. Según, Fabián Jaramillo, gerente técnico de la empresa Inventagri Ecuador, al principio la comercialización de sus biodigestores constituyó un reto constante, ya que los agricultores desconfiaban de su utilidad. Por tal motivo, la empresa se ha preocupado por brindar una continua asistencia a los agricultores para que sus biodigestores y los bioles producidos sean utilizados adecuadamente. En Ecuador varios agricultores emplean bioles en sus cultivos para lograr una reducción de 30 a 40 % en los costos anuales de insumos químicos como fertilizantes, fungicidas e insecticidas.

Por medio de esta iniciativa sus bioles se han convertido en verdaderos biofertilizantes, al incorporar una mayor carga de C-N. Se han alcanzado mayores niveles de productividad en los cultivos de papa (*Solanum tuberosum*), melloco (*Ullucus tuberosus*) y de varias hortalizas de hoja y fruto.

El biofertilizante Wanu Allpa, producido por esta iniciativa, contiene un pH de 9.05, una conductividad eléctrica (mmhos/cm) de 10 480, 300 mg/l de nitrógeno, 20.79 mg/l de fósforo, 69.80 mg/l de calcio, 1.40 mg/l de magnesio, 234.64 mg/l de potasio, 1.43 mg/l de cobre, 24 mg/l de hierro y 26 mg/l de zinc. La dilución que han utilizado en los suelos ha sido 1 l de este biofertilizante en 5 l de agua, mientras que vía foliar ha sido de 1 l del producto en 7 l de agua (ilustración 68).

Ilustración 68. Usos del biofertilizante Wanu Allpa en Ecuador





Además, se encuentra en ejecución un proyecto de recuperación de suelos donde durante varios años se han llevado a cabo monocultivos de plantas ornamentales, a través de la aplicación de estos biofertilizantes en ciclos de 10 a 15 días. Luego de este tratamiento, se realizarán pruebas de germinación con semillas de lechuga para confirmar su recuperación mediante la capacidad de intercambio catiónico y obtener consecuentemente un mayor contenido de microorganismos benéficos, como la *Rhizobium* sp.

Por otra parte, la iniciativa Terrabiol lleva alrededor de cuatro años elaborando y comercializando bioles, obteniendo importantes resultados en algunos cultivos como el cacao (*Theobroma cacao*) y la pitahaya (*Hylocereus undatus*). Cada aplicación ha contribuido al desarrollo de raíces más fuertes, una mejor floración, una resistencia superior a las plagas y una mayor calidad poscosecha. En el caso de la pitahaya, se han obtenido importantes resultados, como el aumento en el número de cosechas: de 2 a 3 cosechas al año en cerca de 30 ha en el noroccidente de la provincia de Pichincha. Asimismo, se han desarrollado 5 tipos de bioles con diferentes composiciones, que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 22. Composición de los bioles de Terrabiol

Tipo de biol	Composición final
Biol #1	2 % de nitrógeno 1.4 % de fósforo 8 % de potasio
Biol #2	10 % de nitrógeno 10 % de fósforo 10 % de potasio UFC de <i>Lactobacillus</i> sp. y levaduras

Biol #3	20 % de nitrógeno 10 % de fósforo 10 % de potasio
Biol #4	10 % de nitrógeno 10 % de fósforo 20 % de potasio
Biol #5	20 % de nitrógeno 20 % de fósforo 20 % de potasio

Fuente: Elaborado con base en TERRABIOL 2019.

Adicionalmente, se ha mejorado la eficiencia en la producción de los bioles, alcanzando una producción de 1000 l/día. Estos resultados se han conseguido a partir del uso de biodigestores tubulares de 12 m y la realización constante de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas para mejorar los biofertilizantes. En este sentido, se han aplicado disoluciones de 1 l de biol/10 l de agua en diversos cultivos como el café (*Coffea arabica*), el cacao (*Theobroma cacao*), la moringa (*Moringa oleifera*), el aguacate (*Persea americana*), la mora (*Rubus glaucus*), la pitahaya (*Hylocereus undatus*), la palma africana (*Elaeis guineensis*) y en diversos pastos (ilustración 69).

Ilustración 69. Aplicaciones foliares de biol

169



Fuente: Tomado de TERRABIOL 2019: 2

4.1.3.2 Asociación Agropecuaria Cotogchoa en Pichincha, Ecuador

A 19 km de Quito se encuentra la parroquia rural de Cotogchoa, en el cantón de Rumiñahui, en la provincia de Pichincha. En este sector, caracterizado por la producción agropecuaria, se localiza la Asociación Agropecuaria Cotogchoa, conformada por agricultoras orgánicas. Esta asociación produce principalmente hortalizas de hoja y fruto, que han alcanzado importantes rendimientos debido a la aplicación de los bioles elaborados por estas mujeres en bidones de 200 l. Los bioles de esta asociación se caracterizan por la variedad de sus ingredientes, entre los que se incluyen excretas de vaca y cuy, roca fosfórica, leche, cáscaras de huevo, extractos vegetales, melaza y levaduras. Los bioles, como productos de la biodigestión anaeróbica, presentan un pH ácido menor a 5.

Su aplicación foliar se efectúa por las tardes, con una concentración de 50 ml/20 l en los cultivos de hortalizas y también en frutales como la uvilla (*Physalis peruviana*) y la frutilla (*Fragaria* sp.). En el caso de hortalizas como el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), la col (*Brassica oleracea* var. *capitata*), el tomate riñón (*Solanum lycopersicum*) y la col rizada (*Brassica oleracea* var. *sabellica*), ha aumentado su nivel de rendimiento en 12 % en relación con su peso neto. Cabe mencionar la necesidad de caracterizar el biol para evitar riesgos en los cultivos. El riesgo de salinidad se evalúa antes de su aplicación en el suelo, confirmando que haya una conductividad eléctrica menor a 1dS/m para evitar la toxicidad, como lo afirma la productora Teresa Chanataxi, miembro de la Asociación desde hace 10 años (ilustración 70).

Ilustración 70. Productora Teresa Chanataxi, de la Asociación Agropecuaria Cotogchoa



Fuente: Tomado de Fundación Humana Pueblo a Pueblo, 2020: 2.

Mediante la asesoría técnica que han recibido las productoras por parte de los ingenieros agropecuarios del Proyecto Aukasisa, se han obtenido interesantes resultados de la aplicación de los bioles en el campo. Así lo afirma el Ing. Gabriel Llumiquinga, fundador del proyecto, tras analizar la respuesta del biol en las hortalizas. En el cultivo de tomate riñón bajo hidroponía con sustrato inorgánico (cascajo), la aplicación del biol, con una conductividad de 0.5 dS/m y pH>5.8 en la primera semana de trasplante, estimula el crecimiento radicular; sin embargo, a partir de la segunda semana, el cultivo requiere nutrientes químicos para mejorar su desarrollo. Por lo tanto, se recomienda el uso de bioles en la hidroponía, como un bioestimulante inicial, para luego continuar con aplicaciones de solución nutritiva convencional (ilustración 71).

Ilustración 71. Estimulación radicular generada por el biol en la Solanum lycopersicum, cultivada en sustrato inerte (cascajo) en la primera semana de trasplante. De izquierda a derecha: solución orgánica (biol), solución orgánica (biol) más minerales y solución mineral



Fuente: Tomado de Fundación Humana Pueblo a Pueblo, 2020: 2.

Ilustración 72. Efectos de altas concentraciones de biol en el cultivo de uvilla



Fuente: Tomado de Fundación Humana Pueblo a Pueblo, 2020: 2.

En la imagen de la derecha se presenta un exceso de desarrollo vegetativo debido a un desbalance nutricional (ilustración 72). De acuerdo con las experiencias en el uso de bioles en varios cultivos hidropónicos con sustrato y en el suelo, se recomienda efectuar aplicaciones en concentraciones menores a 1 dS/m (50-100 ml/20 l) (ilustración 73).

Ilustración 73. Medición de los parámetros de conductividad eléctrica y pH en los bioles



Fuente: Tomado de Fundación Humana Pueblo a Pueblo, 2020: 2.

4.1.3.3 Proyectos en materia de bioles del Estado ecuatoriano y organizaciones civiles

Desde mediados de 2020, en la provincia de Tungurahua, por iniciativa de la prefectura, se ha incentivado la producción agroecológica por medio de la elaboración y comercialización de bioles, a fin de facilitar a los agricultores su adquisición a un precio bajo y su aplicación foliar en sus cultivos de hortalizas, pastos y forrajes (Moreta 2020). En la provincia de Cañar el Ministerio de Agricultura ha brindado capacitación a los agricultores en la elaboración de bioles, debido a lo cual han mantenido el crecimiento de sus cultivos de papa (*Solanum tuberosum*), maíz (*Zea mays*), caña (*Saccharum officinarum*), cacao (*Theobroma cacao* L.) y hortalizas (MAG 2019).

Por otro lado, a mediados de 2020 los técnicos agrícolas de la **Asociación Semilla Productiva** ofrecieron una capacitación a los productores del cantón de Yacuambi, en la provincia de Zamora Chinchipe, durante la cual estos desarrollaron diferentes tipos de bioles como: biol fósforo, biol potasio, biol calcio y biol zinc, entre otros (Fundación Humana Pueblo a Pueblo - Ecuador 2020) (ilustración 74).

Ilustración 74. Capacitación a los productores del cantón Yacuambi en la provincia de Zamora Chinchipe (2020)



Fuente: Tomado de Fundación Humana Pueblo a Pueblo - Ecuador 2020: 2

4.1.4 Procesos de eliminación de nitrógeno utilizados a gran escala

4.1.4.1 Utilización adecuada del digestato

La calidad del biol y su uso potencial como fertilizante dependen de varios factores. La composición y la variabilidad de los sustratos empleados en la biodigestión anaeróbica, el tipo de biodigestor y la tecnología utilizada influyen en su concentración de nitrógeno, fósforo y potasio, así como en la pérdida de nutrientes que tiene lugar durante la estabilización del digestato y la dilución de estos. Además, las diferentes proporciones de sustrato y las cargas usadas en los biodigestores tienen un efecto en la concentración de nutrientes en los digestatos.

La aplicación y el uso agronómico de la fracción líquida derivada de la biodigestión anaeróbica tiene como objetivo reponer la demanda de nutrientes de los cultivos agrícolas en los suelos, como se ha explicado a lo largo de este capítulo. Las plantas exploran el suelo a través de su sistema radicular en busca de nutrientes y agua para su incremento foliar y energético y la maximización de su crecimiento.

Según lo anterior, los suelos menos fértiles requieren menores cantidades de fertilizantes que los más fértiles. La fertilización eleva el contenido de nutrientes de los cultivos hasta su contenido crítico, es decir, la cantidad necesaria para obtener un rendimiento de aproximadamente 90 % de la producción máxima del cultivo fertilizado. Por encima del contenido crítico no se espera un aumento significativo en el rendimiento de los cultivos, debido a los incrementos en los contenidos de N y P del suelo. En estos casos la aplicación continua de fertilizantes supone graves consecuencias para el medio ambiente.

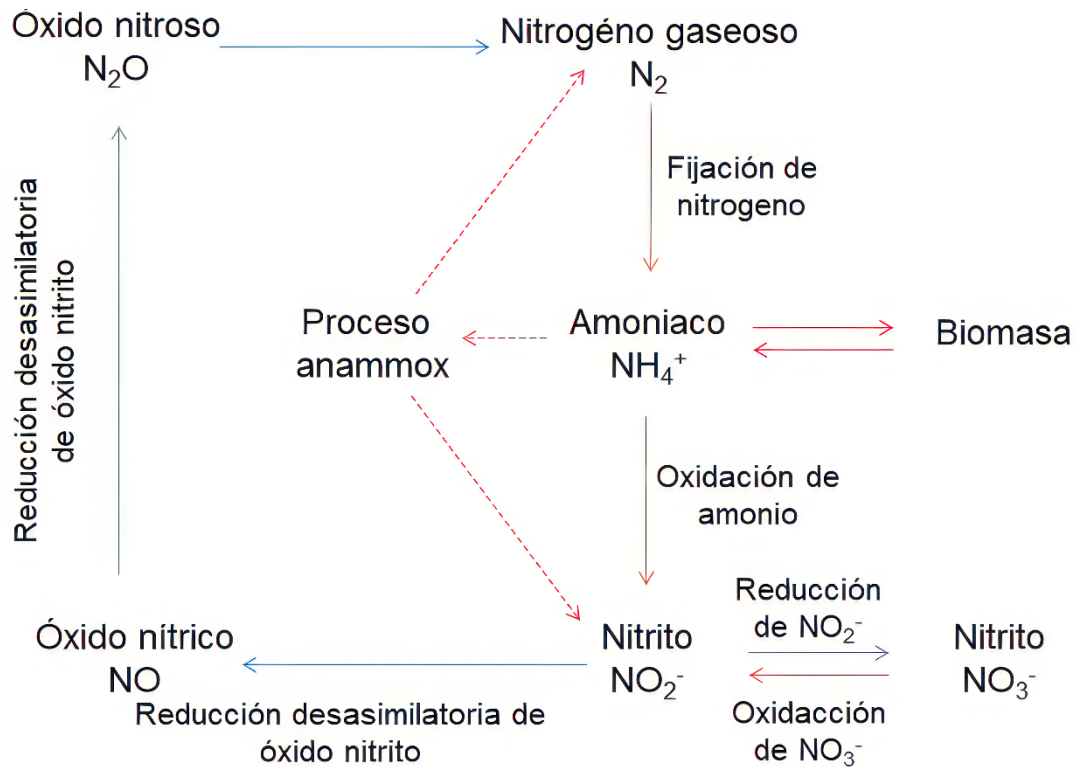
En los casos en los que no se dispone de tierras de cultivo para aprovechar el potencial fertilizante de los bioles, su disposición incorrecta sin tratamiento previo en las masas de agua y en los suelos tiene implicaciones para el medio ambiente y la salud humana. Aunado a ello, se acrecientan cada vez más los desafíos relativos a la gestión del digestato para cumplir con la legislación medioambiental vigente. El nitrógeno en los medios acuáticos puede provocar la eutrofización de las masas de agua en medios lénticos y lóticos, así como la acumulación de nutrientes en el suelo. Cuando se someten a altas cargas, la recuperación ambiental de estos ambientes se torna difícil y costosa, como cuando en las masas de agua se presenta una disminución del oxígeno disuelto y una acumulación de compuestos orgánicos, que generan olor y sabor en el agua (Kunz *et al.* 2019).

Aún hay pocos sistemas de tratamiento con biodigestores que abarquen la eliminación y/o la recuperación del nitrógeno de los digestatos. En su mayoría, los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen lodos activados, en los que el nitrógeno se convierte en nitrato, lo que sigue teniendo efectos negativos por la disminución del oxígeno disuelto de las masas de agua. Debido a las crecientes demandas de las agencias medioambientales en cuanto al manejo del digestato de los efluentes, la evolución de los procesos de tratamiento, que proporcionan una reducción satisfactoria en la concentración de amoníaco, es cada vez más urgente. Algunas estrategias consolidadas y en desarrollo para la eliminación y/o recuperación del nitrógeno de los efluentes, dirigidas a mitigar la posible contaminación del medio ambiente y a cumplir las normas de vertido, se basan en los procesos de nitrificación, desnitrificación y anammox.

4.1.4.2 *El nitrógeno en el digestato y sus principales transformaciones químicas*

En la naturaleza numerosas acciones naturales o antrópicas se producen continuamente para el funcionamiento y el mantenimiento en equilibrio de los sistemas biogeoquímicos. En lo que respecta al ciclo del nitrógeno, este dinamismo proviene de la combinación de reacciones químicas y bioquímicas mediadas por microorganismos. El nitrógeno amoniacal, el nitrito y el nitrato, en sus formas disueltas y particuladas, son los tipos más importantes de este elemento en los ecosistemas (Mitchell *et al.* 2018). A continuación se muestra una representación esquemática del ciclo del nitrógeno (ilustración 75).

Ilustración 75. Etapas del ciclo del nitrógeno



Fuente: Adaptado de Kunz *et al.* 2019.

174

En la ilustración 75 se observan los diferentes estados de oxidación en los que se puede encontrar el nitrógeno, debido a las transformaciones del metabolismo microbiano en los procesos de fijación, nitrificación, reducción desasimilatoria de nitritos, desnitrificación y anammox. La degradación de los compuestos nitrogenados mediante la oxidación y la reducción ocurre por la acción y la sinergia entre los microorganismos para la conversión de $N-NH_3$ a N_2 , un proceso catalizado por enzimas específicas que utilizan los compuestos intermedios del ciclo como donadores y aceptores de electrones.

El amoniac presente en los digestatos, junto con el nitrito, puede ser oxidado por bacterias con actividad anammox (proceso anóxico-ausencia de oxígeno) a N_2 o por bacterias nitrificantes (proceso aeróbico) a nitrito. Posteriormente, el nitrito se puede oxidar a nitrato o, por medio de óxido nítrico y óxido nitroso, convertirse en nitrógeno gaseoso. De estos compuestos e intermedios de reacción, el nitrato es la forma más oxidada en la que se puede encontrar el nitrógeno (Clauwaert *et al.* 2017, Ahlström y Cornell 2018).

El amoniac es soluble en solución acuosa y se encuentra en los efluentes en forma de amoniac molecular (NH_3) o como ion amonio (NH_4^+), variando entre estas formas nitrogenadas según el pH y la temperatura. A 25 °C y un pKa de 9.25 se obtiene el 50 % en ambas formas; no obstante, con valores de pH por debajo del equilibrio, hay predominio del NH_4^+ y, por encima de este, el equilibrio se desplaza hacia la formación de NH_3 (Clauwaert *et al.* 2017). En los digestatos de la porcicultura se combina sobre todo en forma de proteínas y urea. A través de los microorganismos, estas formas se convierten en amoniac y luego se oxidan a nitrito y nitrato (condición más estable y oxidada) (Luo *et al.* 2002, Tchobanoglous *et al.* 2003).

De acuerdo con lo anterior y las crecientes demandas de las agencias ambientales de todo el mundo con respecto a los criterios de gestión de los residuos de la producción animal y de los digestatos, antes de utilizar estos últimos como fertilizantes se debe evaluar la necesidad de efectuar procesos de tratamiento de los efluentes, dirigidos a reducir la concentración de estos contaminantes y a minimizar sus impactos, a fin de satisfacer la demanda nutricional del suelo y la planta y evitar procesos de eutrofización en las masas de agua, provocados por el uso excesivo de fertilizantes.

4.1.4.3 Tecnologías de eliminación de nitrógeno

Según Bai y Liao (2019), los compuestos de nitrógeno, como el amoníaco, el nitrito y el nitrato, cumplen una función significativa en el mantenimiento del ciclo biológico del nitrógeno, debido a lo cual la eliminación de los tipos activos de nitrógeno de los efluentes es importante para proteger los recursos hídricos.

Los procesos de eliminación de nitrógeno por vías biológicas se destacan porque, además de reducir el potencial contaminante de los efluentes, son menos costosos y fáciles de operar y, dentro de ellos, diversas bacterias realizan el proceso de forma conjunta para lograr una eliminación más eficiente. Por lo general, el proceso aplicado en la eliminación biológica del nitrógeno implica dos mecanismos independientes: la nitrificación y la desnitrificación. Esta ruta consiste básicamente en la oxidación del nitrógeno amoniacal vía nitrito a nitrato, en condiciones aeróbicas (nitrificación), seguida de la conversión de nitrito y nitrato a gas nitrógeno, en condiciones anaeróbicas y en presencia de carbono orgánico (desnitrificación) (Hollas *et al.* 2019).

El proceso de nitrificación constituye una reacción microbiológica en la que los microorganismos convierten el nitrógeno amoniacal (NH_3) de los digestatos de la porcicultura en nitrato (NO_3^-). Se trata de una reacción de oxidación en la que el aceptor final de electrones es el oxígeno, es decir, el proceso se produce mediante la aireación de los reactores y se divide en dos etapas de reacción: nitrificación y nitratación. En la primera etapa (nitrificación) los microorganismos capaces de oxidar el amoníaco (bacterias oxidantes del amoníaco, BOA) convierten el nitrógeno amoniacal en nitrito. En la segunda etapa (nitratación) otro grupo de microorganismos que se hallan en el mismo sistema (bacterias oxidantes del nitrito) oxidan el nitrito a nitrato. Ambas bacterias participantes en el proceso de nitrificación requieren oxígeno (O_2) para el metabolismo y la oxidación de los tipos de nitrógeno, el cual se suministra al medio de reacción por medio de sopladeros (Metcalf 2003, Tchobanoglous *et al.* 2003).

La vía metabólica de la desnitrificación consiste en la conversión del nitrato en nitrógeno gaseoso. Este proceso, que sigue a la nitrificación, se lleva a cabo a través de bacterias heterótrofas facultativas en ausencia de oxígeno y en presencia de carbono orgánico. El nitrato (derivado de la nitrificación) se reduce a nitrito, óxido nítrico y posteriormente a gas N_2 y, paralelamente, se produce el consumo del carbono orgánico restante presente en el efluente de la DA.

La ruta combinada de nitrificación/desnitrificación resulta eficiente para tratar digestatos con altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y carbono orgánico residual, lo que conlleva una

eliminación muy eficaz. Desde el punto de vista de la aplicabilidad en granjas y a escala industrial, el modelo propuesto por Ludzack y Ettinger (1962) se destaca por su alta eficiencia y robustez. Básicamente, este sistema se compone de un tanque desnitrificador (anóxico) anterior al tanque nitrificador (aeróbico), donde se produce la oxidación del amoníaco. El nitrato producido en el tanque aireado (nitrificante) vuelve al tanque anóxico (sin oxígeno), donde el sistema se alimenta con el digestato que también tiene materia orgánica. El nitrato y el carbono servirán como electrones para reducir la forma nitrogenada a gas N_2 .

Debido a que el tanque de desnitrificación precede al tanque de nitrificación, el proceso Ludzack-Ettinger modificado es conocido también como “predesnitrificación anóxica”. Este modelo fue aplicado por Cândido *et al.* (2022) en una granja para eliminar el nitrógeno de los digestatos de la porcicultura. La eficiencia del módulo de tratamiento fue superior a 96 %, con un costo de aproximadamente USD 0.30/m³ de efluente tratado.

A pesar de las ventajas y la eficiencia de esta ruta biológica, la demanda de energía para satisfacer las necesidades de oxígeno de las bacterias implicadas en la nitrificación y la necesidad de una fuente exógena de carbono para la desnitrificación siguen dificultando la aplicación de esta técnica. Se están investigando algunos procesos aún no consolidados para que, en un futuro próximo, puedan ser aplicados en la eliminación de nitrógeno de varios tipos de digestatos (Chini *et al.* 2020).

Mediante la investigación en laboratorio se intenta perfeccionar las técnicas para mejorar la eficiencia, reducir los costos y optimizar las estrategias de tratamiento disponibles, buscando nuevas rutas adecuadas para convertir el nitrógeno amoniacal de los digestatos de la agroindustria y el saneamiento en nitrógeno gaseoso.

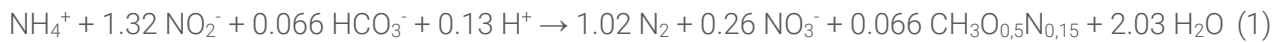
4.1.5 Anammox: procesos avanzados de eliminación de nitrógeno

El proceso de anammox fue uno de los últimos descubrimientos en el ciclo del nitrógeno (1990). Se menciona como uno de los avances tecnológicos más innovadores para la eliminación y el tratamiento de una gama de efluentes con altas concentraciones de nitrógeno. En cuanto a los bioles agroindustriales, los procesos aún no están totalmente consolidados, mientras que los nuevos reactores y las condiciones operativas siguen siendo objeto de investigación.

Los principales planteamientos que vuelven atractiva esta vía tecnológica son la posibilidad de que las bacterias de anammox actúen junto con varios grupos bacterianos (nitrificantes y desnitrificantes) y que, aunque se vean inhibidas por determinadas condiciones operativas (temperatura, oxígeno disuelto, pH y presencia de materia orgánica), el proceso es flexible y se puede restablecer debido al bajo tiempo de retención hidráulica (TRH) de los reactores de anammox. Aunque las bacterias de anammox presentan un crecimiento lento debido al alto tiempo de duplicación, el bajo TRH de los reactores, el ahorro de energía con la aireación y la baja generación de lodos permiten una investigación continua de esta ruta para su futura aplicación en el tratamiento de los digestatos (van de Graaf *et al.* 1995).

La ruta de anammox consiste en la oxidación anaeróbica del ion amonio directamente a N_2 por medio de microorganismos específicos, utilizando el nitrito (derivado de la nitrificación parcial) como aceptor de electrones. Como residuo hay una pequeña producción de nitrato (figura 1).

En otras palabras, no hay necesidad de materia orgánica, como en las rutas convencionales de eliminación de nitrógeno exploradas anteriormente (ecuación 1).



Aunque el proceso de anammox supone algunas ventajas relacionadas con la eficiencia en la eliminación de nitrógeno amoniacal y menores requerimientos energéticos en comparación con otros procesos biológicos, aún se deben investigar algunas deficiencias para aumentar la aplicabilidad de esta ruta en el tratamiento de digestatos. La biomasa de anammox presenta una baja tasa de crecimiento, una lenta puesta en marcha del proceso y cierta sensibilidad a la variabilidad de las características del digestato; por lo tanto, las propiedades del efluente se deben mantener lo más constantes posible para que el proceso en cuestión resulte eficiente (Strous *et al.* 1998, Tomaszewski *et al.* 2017).

4.1.6 Procesos combinados

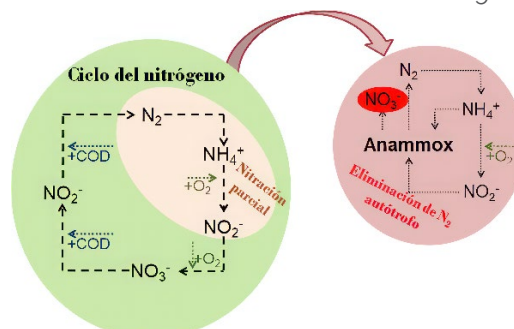
4.1.6.1 Proceso de nitrificación parcial

El proceso de anammox depende en gran manera de la disponibilidad de nitrito para los microorganismos, como se muestra en la ecuación 1. Se requiere 1.32 mol de nitrito para la oxidación de 1 mol de amonio (Bonassa *et al.* 2021). De conformidad con lo anterior, el desarrollo de técnicas que combinen el anammox con otros procesos biológicos puede desempeñar un papel importante en el tratamiento de efluentes y en una eliminación de nitrógeno más eficiente, ya que estas bacterias son capaces de asociarse con otros microorganismos. Como ejemplo se pueden citar los procesos de nitrificación parcial, basados en la oxidación parcial del amoníaco presente en los digestatos a nitrito, a partir de la selección y el favorecimiento de las BOA (Augusto *et al.* 2018).

La desamonificación, una tecnología que efectúa simultáneamente la nitrificación parcial y el proceso de anammox, constituye una alternativa prometedora para eliminar altas cargas de nitrógeno en los digestatos. Estas configuraciones son importantes desde el punto de vista económico y medioambiental, ya que maximizan la recuperación de energía, producen pocos lodos y pueden llevarse a cabo en un único reactor. Esta tecnología ya ha sido transferida y aplicada al tratamiento de aguas residuales como las domésticas y los efluentes de la industria alimentaria.

En la ilustración 76, adaptada de Van Hulle *et al.* (2010), se muestra cómo se produce en el ciclo del nitrógeno el proceso de desamonificación a través de la eliminación autotrófica del nitrógeno amoniacal.

Ilustración 76. Proceso de desamonificación en el ciclo biogeoquímico del nitrógeno



Fuente: Adaptado de Van Hulle *et al.* 2010.

4.1.6.2 Procesos de desamonificación

La técnica de nitrificación parcial/anammox se considera una vía completamente autotrófica para la eliminación de nitrógeno, destinada al tratamiento de efluentes ricos en amonio (150-2000 mg NH₄⁺-N L⁻¹). Este proceso se puede llevar a cabo en reactores separados o en uno solo, debido a la capacidad de estos microorganismos para formar un grupo y actuar en simbiosis. El proceso conlleva una economía en cuanto a la aireación, una baja producción de lodos y la exención de la necesidad de suplementación de una fuente externa de carbono orgánico (De Prá *et al.* 2021).

Giustinianovich *et al.* (2018) afirman que esta opción de tratamiento posibilita un ahorro de 50 % en relación con aspectos energéticos, ya que solo la mitad del amoniaco contenido en el efluente se oxida a nitrito en la etapa de nitrificación parcial, así como en la materia orgánica necesaria en las metodologías convencionales (etapa de desnitrificación), con aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales con una alta concentración de nitrógeno y una baja concentración de materia orgánica, como sobrenadantes de la DA.

Teniendo en cuenta las características de los digestatos agroindustriales y con el objetivo de cumplir con la legislación vigente de vertido de aguas residuales en las masas de agua de las formas nitrogenadas, se sabe que en los procesos de desamonificación se debe conseguir la máxima eficiencia y un buen grupo bacteriano. Por lo tanto, para aplicar este proceso en varios digestatos, una de las barreras tecnológicas que todavía se está mejorando guarda relación con la fracción de carbono de baja biodegradabilidad que queda de la DA, es decir, el carbono que ya no es consumido por las arqueas metanógenas para producir biogás y que no es suficiente para las bacterias heterótrofas (en el caso de la aplicabilidad del proceso convencional de nitrificación/desnitrificación), pero que puede inhibir las bacterias de anammox. Debido a esto, los procesos de eliminación de nitrógeno siguen siendo mejorados y estudiados con fines de aplicabilidad en una gama de sustratos que tienen diferentes concentraciones de nitrógeno y variabilidad en su composición fisicoquímica de micro y macronutrientes.

4.1.7 Normativa en materia de bioles

Como consecuencia del aumento en la producción de biogás, las cantidades de digestato también se han incrementado (Risberg *et al.* 2017), creando la necesidad de implementar normativas específicas para la regulación del biol/digestato. P. ej., en Chile, en 2015 se estableció la norma NCh 3375 que, si bien no es limitante para el uso personal, sí se presenta como la única pauta en los casos en que se busque comercializar el digestato, en la cual se sugieren los requisitos de calidad del digestato en términos del grado de fermentación-estabilización, de materia orgánica y de contenido de nutrientes, entre otros. Dicha norma establece también los métodos de ensayo en la determinación de parámetros químicos, físicos y microbiológicos y los requisitos que deben cumplir las materias primas para la producción de digestato (INN 2015).

Actualmente en países como Colombia y Ecuador no existe una normativa específica para la elaboración y el uso de bioles en los campos agrícolas; sin embargo, en el caso de Ecuador, la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (AGROCALIDAD) es la institución pública encargada de realizar controles en cuanto al registro de este tipo de bioinsumos agropecuarios.

En este sentido, en la sección XI del *Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas del suelo y productos afines de uso agrícola* de 2020 se detallan los requisitos específicos para el registro de bioles. Reconociendo que se trata de productos resultantes de procesos fermentativos y que su composición cambia con el paso del tiempo, se recomienda no almacenarlos más de 60 días después de su envasado (AGROCALIDAD 2020).

Además, en dicho manual se especifica que el producto debe indicar la ausencia de *Salmonella* sp. en 25 g o 25 ml, así como de *Listeria monocitogenes*, *Shigella* sp., *Staphylococcus aureus* y fitopatógenos. En el caso de la *Escherichia coli* y de coliformes totales, se aceptan límites de 1000 UFC (g-1 o ml-1). Estos análisis microbiológicos deben ser certificados por laboratorios nacionales o internacionales. De igual manera la AGROCALIDAD forma parte del proceso de certificación orgánica en virtud de la Normativa General para Promover y Regular la Producción Orgánica-Ecológica-Biológica en el Ecuador, expedida en 2013. En dicha normativa se indican en detalle los insumos orgánicos y biológicos necesarios para llevar a cabo una producción orgánica con estándares de certificación (Agrocalidad, 2020).

En Colombia el ICA es una entidad pública adscrita al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural que, entre otras funciones, cumple la de garantizar la calidad de los insumos agrícolas utilizados en el país. A partir del trabajo integrado entre el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), el ICA y el Comité Técnico 73 Productos químicos básicos para la industria agrícola, se emitió la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 de 2011, en la que se establecen los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo (ICONTEC 2011). En la tabla 23 se presenta una comparación de los indicadores que estas normas sugieren, así como los rangos de valores aceptables en cada caso.

Según la NTC 5167, todo producto cuyo origen sea materia orgánica fresca debe someterse a procesos de transformación que garanticen su estabilidad agronómica. Entre los requisitos que debe tener un producto como el biol para clasificarse como fertilizante orgánico líquido se encuentran: un pH inferior a 8.5, nitrógeno total, fósforo y potasio solubles superiores a 15 g/l cada uno, el cumplimiento de los contenidos máximos permisibles de metales pesados y parámetros microbiológicos como coliformes totales y huevos de helminto, y la ausencia de salmonela, hongos y nemátodos fitopatógenos (ICONTEC 2011).

Tabla 23. Comparación de parámetros sugeridos

Variable	NTC 5167 2011 Límite normativo *	Norma NCh 3375 Límite normativo ** (base seca)
Físicos		
pH	< 8.5	Reportar
Densidad	Reportar g/cm ³	n/a
Conductividad eléctrica	Reportar dS/m	Reportar
Sólidos insolubles en agua	<40 g/l	n/a
Químicos		
Contenido de carbono orgánico oxidable	> 20 g/l	Reportar

total			
N nítrico	Reportar g/l	Reportar	
N amoniacal	Reportar g/l	Reportar	
N ureico	Reportar g/l	Reportar	
N orgánico	Reportar g/l	Reportar	
N total*	> 15 g/l	Reportar	
Fósforo soluble (P2O5)*	> 15 g/l	Reportar	
Potasio soluble (K2O)*	> 15 g/l	Reportar	
Calcio soluble CaO	Reportar g/l	Reportar	
Magnesio soluble MgO	Reportar g/l	Reportar	
Azufre soluble	Reportar g/l	Reportar	
Metales pesados			
Arsénico total	< 41 mg/L	< 55 mg/kg	
Cadmio total	< 39 mg/l	<15 mg/kg	
Cromo total	< 1200 mg/l	< 167 mg/kg	
Mercurio total	< 17 mg/l	< 3 mg/kg	
Níquel total	< 420 mg/l	<133 mg/kg	
Plomo total	< 300 mg/l	< 367 mg/kg	
Microbiológicos			
Salmonela	Ausente 25 ml	< 3 NMP/ 4g	
Coliformes totales	< 100 UFC/ml	n/a	
<i>Escherichia coli</i>	n/a	< 1000 NMP/4g	
Huevos de helminto	< 1 huevo/ 4g	< 1 huevo/4g	
Hongos fitopatógenos	Ausente	n/a	
Nematodos fitopatógenos	Ausente	n/a	

Nota: Los elementos por registrar deben sumar como mínimo 40 g/l.

** Concentraciones expresadas como contenidos totales.

n/a: no se aplica

Fuente: Adaptado de ICONTEC 2011; INN 2015

4.1.8 Referencias bibliográficas

AGROCALIDAD (Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro). s. f. Instructivo de la normativa general para promover y regular la producción orgánica-ecológica-biológica en el Ecuador (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/by3.pdf>.

AGROCALIDAD (Agencia de Regulación y Control Fito y Zoon sanitario, Ecuador). 2020. Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícola (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/ac6.pdf>.

Ahlström, H; Cornell, SE. 2018. Governance, polycentricity and the global nitrogen and phosphorus cycles. *Environmental Science and Policy* 79:54-65.

Albuquerque, JA; de la Fuente, C; Ferrer-Costa, A; Carrasco, L; Cegarra, J; Abad, M; Bernal, MP. 2012. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy* 40:181-189.

- Armenta Bojórquez, AD; García Gutiérrez, C; Camacho Báez, JR; Apodaca Sánchez, MÁ; Gerardo Montoya, L; Nava Pérez, E. 2010. Biofertilizantes en el desarrollo agrícola mexicano. *Ra Ximhai* 6(1):51-56.
- Augusto, MR; Camiloti, PR; de Souza, TSO. 2018. Fast start-up of the single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitritation (SNAP) from conventional activated sludge in a membrane-aerated biofilm reactor. *Bioresource Technology* 266:151-157.
- Bai, H; Liao, S. 2019. Bioresource technology high-efficiency inorganic nitrogen removal by newly isolated *Pannonibacter phragmitetus* B1. *Bioresource Technology* 271:91-99.
- Bonassa, G. Chiapetti Bolsan, A; Hollas, CE; Venturin, B; Candido, D; Chini, A; De Prá, MC; Goldschmidt Antes, F; Campos, JL; Kunz, A. 2021. Organic carbon bioavailability: is it a good driver to choose the best biological nitrogen removal process? *Science of the Total Environment* 786.
- Cândido, D. Chiapetti Bolsan, A; Hollas, CE; Venturin, B; Tápparo, DC; Bonassa, G; Antes, F; Radis Steinmetz, RL; Bortoli, M; Kunz, A. 2022. Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. *Journal of Environmental Management* 301.
- Cano Hernández, M; Bennet Eaton, A; Silva Guerrero, E. 2016. Caracterización de bioles de la fermentación anaeróbica de excretas bovinas y porcinas. *Agrociencia* 50(4):471-479.
- Castro, L; Escalante, H; Jaimes-Estévez, J; Díaz, LJ; Vecino, K; Rojas, G; Mantilla, L. 2017. Low cost digester monitoring under realistic conditions: rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology* 239:311-317.
- Chini, A; Bolsan, AC; Hollas, CE; Antes, FG; Fongaro, G; Treichel, H; Kunz, A. 2019. Evaluation of deammonification reactor performance and microorganisms community during treatment of digestate from swine sludge CSTR biodigester. *Journal of Environmental Management* 246:19-26.
- Chini, A; Hollas, CE; Chiapetti Bolsan, A; Venturin, B; Bonassa, G; Cantão, ME; Guaratini Ibelli, AM; Goldschmidt Antes, F; Kunz, A. 2020. Process performance and anammox community diversity in a deammonification reactor under progressive nitrogen loading rates for swine wastewater treatment. *Bioresource Technology* 311.
- Clauwaert, P; Muys, M; Alloul, A; De Paepe, J; Luther, AK; Sun, X; Ilgrande, C; Christiaens, M; Hu, X; Zhang, D; Lindeboom, R; Sas, B; Rabaey, K; Boon, N; Ronsse, F; Geelen, D; Vlaeminck, SE. 2017. Nitrogen cycling in bioregenerative life support systems: challenges for waste refinery and food production processes. *Progress in Aerospace Sciences* 91:87-98.
- Coelho, JJ; Prieto, ML; Dowling, S; Hennessy, A; Casey, I; Woodcock, T; Kennedy, N. 2018. Physical-chemical traits, phytotoxicity and pathogen detection in liquid anaerobic digestates. *Waste Management* 78:8-15.
- De Prá, MC; Bonassa, G; Bortoli, M; Soares, HM; Kunz, A. 2021. Novel one-stage reactor configuration for deammonification process: hydrodynamic evaluation and fast start-up of NITRAMMOX® reactor. *Biochemical Engineering Journal* 171.

- Fotidis, IA; Laranjeiro, TFVC; Angelidaki, I. 2016. Alternative co-digestion scenarios for efficient fixed-dome reactor biomethanation processes. *Journal of Cleaner Production* 127:610-617.
- Fundación Humana Pueblo a Pueblo - Ecuador. 2020. La Asociación Semilla Productiva brinda una charla de preparación y manejo de fertilizantes (en línea). Quito. Consulta Disponible en <https://humana-ecuador.org/2020/07/08/la-asociacion-semilla-productiva-brinda-una-charla-de-preparacion-y-manejo-de-fertilizantes/>.
- Giustinianovich, EA; Campos, JL; Roeckel, MD; Estrada, AJ; Mosquera Corral, A; Val del Río, Á. 2018. Influence of biomass acclimation on the performance of a partial nitrification-anammox reactor treating industrial saline effluents. *Chemosphere* 194:131-138.
- Guilayn, F; Jiménez, J; Martel, JL; Rouez, M; Crest, M; Patureau, D. 2019. First fertilizing-value typology of digestates: a decision-making tool for regulation. *Waste Management* 86:67-79.
- Guzmán Flores, J. 2018. Fertilizantes químicos y biofertilizantes en México (en línea). San Lázaro, México, CEDRSSA. 37 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/64%20Fertilizantes%20qu%C3%ADmicos%20y%20biofertilizantes%20en%20M%C3%A9xico..pdf>.
- He, Z; Feng, Y; Zhang, S; Wang, X; Wu, S; Pan, X. 2018. Oxygenic denitrification for nitrogen removal with less greenhouse gas emissions: microbiology and potential applications. *Science of the Total Environment* 621:453-464.
- Hidalgo, D; Martín-Marroquín, JM; Corona, F. 2019. A multi-waste management concept as a basis towards a circular economy model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 111:481-489.
- Hollas, CE; Chini, A; Antes, FG; do Prado, NV; Bortoli, M; Kunz, A. 2019. Modified Ludzack-Ettinger system role in efficient nitrogen removal from swine manure under high total suspended solids concentration. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16(12):7715-7726.
- ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). 2011. Productos para la industria agrícola: productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Bogotá, Colombia. 23 mar.
- INN (Instituto Nacional de Normalización, Chile). 2015. Digestato: requisitos de calidad. Norma Chilena NCh 3375. Santiago, Chile. 27 ago.
- INVENTAGRI S. A. 2020. INVENTAGRI: empresa agroindustrial (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://inventagri.com.ec/new/>.
- Kennedy Freeman, K. 14 jun. 2019. El poder del estiércol: los biodigestores crean oportunidades para los agricultores de África (en línea, blog). Washington D. C., Estados Unidos de América, Banco Mundial. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://blogs.worldbank.org/es/voices/el-poder-del-estiercol-los-biodigestores-crean-oportunidades-para-los-agricultores-de-africa>.

- Kunz, A. Steinmetz, RLR; do Amaral, AC (eds.). 2019. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 1 ed. Concórdia, Brasil, SBERA.
- Locoli, GA; Zabaloy, MC; Pasdevicelli, G; Gómez, MA. 2019. Use of biogas digestates obtained by anaerobic digestion and co-digestion as fertilizers: characterization, soil biological activity and growth dynamic of *Lactuca sativa* L. *Science of the Total Environment* 647:11-19.
- Luo, AC; Zhu, J; Ndegwa, PM. 2002. Removal of carbon, nitrogen, and phosphorus in pig manure by continuous and intermittent aeration at low redox potentials. *Biosystems Engineering* 82(2):209-215.
- Ma, H; Guo, Y; Qin, Y; Li, YY. 2018. Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 269:520-531.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Ecuador). 2019. Cañar: MAG promueve elaboración y uso de biol como fertilizante natural (en línea). Quito. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.agricultura.gob.ec/canar-mag-promueve-elaboracion-y-uso-de-biol-como-fertilizante-natural/>.
- Ménesguen, A; Lacroix, G. 2018. Modelling the marine eutrophication: a review. *Science of the Total Environment* 636:339-354.
- Mitchell, ME; Hamilton, TL; Uebel-Niemeier, C; Hopfensperger, KN; Buffam, I. 2018. Nitrogen cycling players and processes in green roof ecosystems. *Applied Soil Ecology* 132:114-125.
- Moreta, M. 2020. Los agricultores de Tungurahua se benefician de los abonos orgánicos para producir alimentos sanos (en línea). *El Comercio*, Lima, Perú; 26 ago. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/agricultores-tungurahua-abonos-organicos-alimentos.html>.
- Mortola, N; Romaniuk, R; Cosentino, V; Eiza, M; Carfagno, P; Rizzo, P; Bres, P; Riera, N; Roba, M; Butti, M; Sainz, D; Brutti, L. 2019. Potential use of a poultry manure digestate as a biofertiliser: evaluation of soil properties and *Lactuca sativa* growth. *Pedosphere* 29(1):60-69.
- Risberg, K; Cederlund, H; Pell, M; Arthurson, V; Schnürer, A. 2017. Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure-chemical composition and effects on soil microbial activity. *Waste Management* 61:529-538.
- Riva, C; Orzi, V; Carozzi, M; Acutis, M; Boccasile, G; Lonati, S; Tambone, F; D'Imporzano, G; Adani, F. 2016. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of the Total Environment* 547:206-214.
- Sliemers, A. 2002. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor. *Water Research* 36(10):2475-2482.
- Strous, M; Heijnen, JJ; Kuenen, JG; Jetten, MSM. 1998. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 50(5):589-596.

- Tambone, F; Scaglia, B; D'Imporzano, G; Schievano, A; Orzi, V; Salati, S; Adani, F. 2010. Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere* 81(5):577-583.
- Tchobanoglous, G; Burton, FL; Stensel, HD. 2003. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 4 ed. Nueva York, Estados Unidos de América, Mc Graw Hill.
- TERRABIOL. 2019. Bienvenido a TERRABIOL: abono orgánico (en línea). Ecuador. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://terrabiolec.wixsite.com/terrabiol>.
- Tomaszewski, M; Cema, G; Ziemińska-Buczyńska, A. 2017. Influence of temperature and pH on the anammox process: a review and meta-analysis. *Chemosphere* 182:203-214.
- US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). 2016. Biosolids (en línea). Consultado 16 dic. 2016. Disponible en <https://www.epa.gov/biosolids>.
- van de Graaf, AA; Mulder, A; de Bruijn, P; Jetten, MS; Robertson, LA; Kuenen, JG. 1995. Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process. *Applied and Environmental Microbiology* 61(4):1246-1251.
- Van Hulle, SWH. Vandeweyer, HJP; Meesschaert, B; Vanrolleghem, PA; Dejjans, P; Dumoulin, A. 2010. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams. *Chemical Engineering Journal* 162(1):1-20.
- Van Niftrik, L; Jetten, MSM. 2012. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: unique microorganisms with exceptional properties. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 76(3):585-596.
- Viancelli, A; Kunz, A; Esteves, PA; Bauermann, FV; Furukawa, K; Fujii, T; Antônio, RV; Vanotti, M. 2011. Bacterial biodiversity from an anaerobic up flow bioreactor with ANAMMOX activity inoculated with swine sludge. *Brazilian Archives of Biology and Technology* 54(5):1035-1041.
- Viancelli, A; Pra, MC; Scussiato, LA; Cantão, M; Ibelli, AMG; Kunz, A. 2017. Preservation and reactivation of *Candidatus jettenia asiatica* and *Anammoxoglobus propionicus* using different preservative agents. *Chemosphere* 186:453-458.

4.2 Producción y aptitud fertilizante del digestato proveniente de plantas de DA en Chile

Autores: Alfredo Erlwein y Eliana Sotomayor

La DA es un proceso natural en el que los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno en un ambiente controlado. Se realiza en plantas de biogás, donde se degrada una parte de dicha materia en dos productos fundamentales: biogás y la fracción orgánica digerida que no puede ser transformada en biogás, llamada digestato, digestado, etc. La cantidad producida es similar a la masa de sustrato que ingresa en el proceso de fermentación de la planta de biogás (Koszel y Lorencowicz 2015).

El digestato, como fertilizante natural con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica, se presenta como un insumo fundamental en el creciente mercado de los fertilizantes, sobre todo en el de productos orgánicos, debido a lo cual su demanda aumentará y simultáneamente mejorará la rentabilidad de las plantas de biogás y contribuirá a resolver problemas medioambientales en beneficio del entorno.

4.2.1 Producción actual de digestato

Actualmente existen diversos factores que determinan un escenario aún incipiente en cuanto al funcionamiento de plantas de biogás en Chile. La falta de capacitación técnica de los operarios; el bajo precio de la energía eléctrica, que reduce los incentivos para el desarrollo de nuevos proyectos y para la venta de energía eléctrica en las plantas instaladas; y la inexistencia de un mercado del digestato son los principales factores que limitan el desarrollo de este tipo de energía alternativa.

Si bien en el catastro del Ministerio de Energía (2017) están registradas 104 iniciativas vinculadas al uso de residuos para la producción de biogás, alrededor del 50 % de estas plantas no se encuentran en funcionamiento por falta de capacidades técnicas (incapacidad de manejar situaciones complejas durante su operación), la ausencia de financiamiento y/o la escasa pertinencia de los proyectos. Este último punto se refiere a algunos proyectos de pequeña escala, demostrativos, instalados en escuelas y liceos agrícolas, los cuales se implementaron en cada institución sin conocer las reales condiciones del lugar, lo que llevó finalmente a que ninguno de esos proyectos funcionara como se planeó.

En la tabla 24 se muestra la producción de digestato en Chile (de las regiones V y X). Obsérvese que la industria porcina concentra casi el 90 % de dicha producción en el país.

Tabla 24. Producción actual de digestato en las regiones V y X de Chile

Industria	Digestato total (m ³ /año)	Digestato total (%)
Porcina	4 580 878	89
Lechera	476 600	9
Vitivinícola	98 390	2
Total	5 155 868	100

4.2.2 Producción potencial de digestato

Para estimar la producción potencial de digestato se identificó en las industrias avícola, porcina y lechera el número de aves (de carne, ponedoras y pavos) y de cabezas de cerdo y vacuno (Chamy y Vivanco 2007) de las regiones V a la X. Con estos datos y la cantidad de residuos húmedos generados por cada una (Marculescu y Stan 2011, Blanco 2016 y Salazar 2018) se obtuvo la cantidad de residuos totales generados en esas regiones. Al considerar la humedad de cada residuo y su digestibilidad (% MS) luego de pasar por un digestor anaerobio, se obtuvo la generación total de digestato de dichas industrias.

La información sobre la generación de residuos de las industrias cervecera, vinícola, procesadora de verduras y frutas y láctea se obtuvo directamente de Chamy y Vivanco (2007). El valor de la digestibilidad del bagazo de la cerveza, del orujo de uva y del procesamiento de verduras y frutas se obtuvo de Babel *et al.* (2009) y Ramos y Jesús (2017), mientras que el correspondiente a la industria láctea es el ofrecido por Lebrato (1986).

Los resultados, que se presentan en la tabla 25, muestran que el mayor potencial de producción de digestato lo posee la industria porcina, con un poco más del doble del digestato generado en la actualidad. La industria avícola tiene un importante potencial en el país que aún desarrollado. En cuanto a la industria lechera, el potencial de producción de

digestato es casi 10 veces mayor que lo que se genera actualmente. Cabe destacar que estas 3 industrias concentran más del 99 % del potencial ganadero total en el ámbito nacional.

En general, se observa que el potencial de producción de digestato entre las regiones V y X de Chile se aproxima a los 20 887 889 m³/año, lo que equivale a 4 veces su producción actual.

Tabla 25. Generación anual de residuos y potencial de digestato en Chile entre las regiones V y X, con los valores estimados de humedad y digestibilidad correspondientes a cada uno.

Industria	Total de residuos (m ³ /año)	Humedad (%)	Digestibilidad (%MS)	Total de digestato (m ³ /año)
Porcina	9 421 668	90	65	9 091 910
Avícola	7 187 903	70	48	6 144 219
Lechera	5 881 917	90	50	5 587 821
Cervecera	15 682	21	20	13 204
Vinícola	12 152	20	20	10 208
Procesadora de verduras y frutas	39 218	20	20	32 943
Láctea	7956	94	78	7584
TOTAL				20 887 889

4.2.2.1 Aptitud fertilizante del digestato

Distintos estudios señalan que, luego de considerar sus propiedades físico-químicas, el digestato debería ser empleado como biofertilizante y un potencial reemplazo de fertilizantes minerales, debido a su alta proporción de nutrientes mineralizados. Por lo tanto, existe un amplio consenso con respecto a la aptitud fertilizante que este posee (Robles y Jansen, 2008, Lukehurst *et al.* 2010, WRAP 2012, Risberg *et al.* 2017).

En general, en la literatura consultada se señala que, luego de comparar el digestato con los purines sin digerir, se determinó que ambos poseen la misma cantidad de macro y micronutrientes; no obstante, el digestato presenta una alta proporción de nutrientes mineralizados que está rápidamente disponible para las plantas, a diferencia del purín sin digerir. Por otra parte, luego de analizar en el laboratorio distintos digestatos del centro y el sur de Chile, se descubrió que hubo pérdidas de nitrógeno en el proceso de digestión, puesto que la concentración total de este nutriente se redujo con respecto a la del substrato original. Asimismo, cuando disminuye el contenido de materia orgánica de los purines, existe un menor aporte de esta al suelo y su biología (Voelkner *et al.* 2015), lo que se considera una desventaja; sin embargo, también se reduce la relación carbono/nitrógeno (C/N), lo que implica que su efecto fertilizante es más rápido que el de los purines.

Cuando la relación C/N es muy alta, los microorganismos del suelo toman este N para usarlo en sus procesos metabólicos y en la síntesis de enzimas, como parte de la degradación del mismo carbono del fertilizante, por lo que las plantas ya no disponen de N en el corto plazo (Al

Seadi *et al.* 2008). Como se verá más adelante, los resultados de este estudio no concuerdan con lo encontrado en la literatura con respecto a la ausencia de cambios en el contenido total de N, cuando se compara el purín sin digerir y el digestato. Eventualmente, las pérdidas encontradas según nuestros datos podrían evidenciar una volatilización del N por condiciones subóptimas. Por otra parte, los datos muestran que aumenta la proporción de amonio (NH_4^+), lo que constituye un aspecto positivo como fertilizante, puesto que esta forma de N esta inmediatamente disponible para la planta (Schroeder *et al.*, citados por Lukehurst *et al.* 2010).

Por otra parte, se señala como regla general que el 50 % del fósforo (P) y el 80 % del potasio (K) estarán disponibles para el cultivo al primer año de la aplicación. Esos valores deberían ser usados para calcular la dosis según los requerimientos del cultivo (WRAP 2012).

Cabe mencionar que, si se separa la fracción líquida de la sólida, los nutrientes no se separan en igual proporción; en el caso del N y el K, la mayor parte se va disuelta en la fracción líquida. Por otra parte, el P se queda adherido mayormente a la fibra de la fracción sólida (Al Seadi *et al.* 2008), por lo que se deben considerar las características de cada fracción del digestato, así como las necesidades del suelo de cada agricultor en el momento de decidir el destino del digestato.

En cuanto a los cationes del suelo, Robles y Jansen (2008) señalan que el uso del biol (la fracción líquida) permite un mejor intercambio catiónico en el suelo, con lo cual se amplía la disponibilidad de nutrientes del suelo.

Según varios estudios realizados en Polonia, el uso del digestato como fertilizante en la alfalfa incrementa el contenido de macro y microelementos en el suelo y las plantas. Además, aumenta el contenido de macroelementos en las hojas, en comparación con el testigo donde se aplica fertilizante mineral (Koszel y Lorencowicz 2015).

En la Universidad de Cornell (Estados Unidos), Morris y Lathwell (2004) encontraron que el digestato mejoró significativamente el rendimiento del maíz con respecto a testigos no fertilizados; no obstante, al compararlo con el purín crudo, no hay diferencias significativas en suelos alcalinos, mientras que en suelos ácidos, como los andisoles del sur de Chile, el purín crudo presentó mejores rendimientos.

En las praderas el comportamiento del digestato no está totalmente claro aún, ya que existen algunas discrepancias sobre sus ventajas con respecto a los fertilizantes minerales o a los purines crudos. Walsh *et al.*, citados por Montalvo *et al.* (2018), reportaron que en el Reino Unido, en praderas de ballico perenne (*Lolium perenne* L.), el digestato registró rendimientos superiores a los de las praderas mixtas con trébol blanco y de las fertilizadas con N y NPK, que no registraron diferencias en relación con las praderas no fertilizadas.

Tampere y Viiralt (2014) reportaron que en Estonia, luego de aplicar digestato como fertilizante, se incrementó la producción de materia seca en praderas de clima templado, como las del sur de Chile, en comparación con las que no se fertilizaron; asimismo, no se registraron diferencias con la fertilización química y concluyeron que los digestatos pueden sustituir a los fertilizantes químicos.

Sin embargo, de acuerdo con los mismos autores, durante el período de evaluación el purín crudo de vacuno obtuvo mejores rendimientos que el digestato, lo que podría explicarse porque calcularon las dosis de digestato y purín según su contenido de N ($180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Dado que el digestato tenía una concentración levemente mayor de este nutriente, correspondía aplicar 57 t ha^{-1} de digestato y 69 t ha^{-1} de purín, lo que implica un menor contenido de otros nutrientes en esa dosis de digestato.

Según Rancane *et al.*, citados por Montalvo *et al.* (2018), los digestatos tienen efectos diferentes en cada especie de pasto, por lo que se debe conocer la reacción de las especies a este tipo de fertilización para lograr un adecuado manejo y aprovechamiento integral de este recurso. Además, de acuerdo con estos últimos autores, las plantas de ballico presentaron una mayor producción luego de su fertilización con digestato, en comparación con el fertilizante mineral.

Según Martí, citado por Martí *et al.* (2017), en la lechería la utilización de digestato ofrece beneficios sobre la aplicación de purines, ya que este ya ha sido degradado y estabilizado y sus nutrientes, mineralizados, mientras que, en el purín crudo, este proceso ocurre en el suelo, por lo que requiere mucho más tiempo. Por consiguiente, el crecimiento del pasto es más rápido cuando se aplica digestato, debido a lo cual las vacas pueden retornar a este pastizal recuperado en un plazo menor. Testimonios en Chile, Ecuador y Bolivia reportan un 25 % de reducción en el tiempo necesario para que la vaca vuelva a entrar en el potrero.

Por otra parte, se han publicado trabajos de investigación según los cuales el digestato tuvo resultados subóptimos en la producción de cebada, avena y trigo; no obstante, estos trabajos involucraron prácticas agronómicas cuestionables, como la aplicación del producto en la superficie del campo y un almacenamiento y un manejo inadecuados de los digestatos. Estos últimos pueden provocar la pérdida de su valor como fertilizante o el uso ineficiente del nitrógeno, mediante la volatilización del amoníaco, la lixiviación y la escorrentía en aguas superficiales y subterráneas.

Los mecanismos de volatilización son bien conocidos: la DA del nitrógeno orgánico da como resultado un aumento en los niveles de nitrógeno inorgánico soluble, principalmente de amonio (Möller y Stinner, citados por Nkoa 2013) y en su equilibrio de amoníaco. La pérdida de nitrógeno por medio de la volatilización del amoníaco dependería de variables tales como las condiciones de almacenamiento (p. ej., el tanque de lodo no cubierto) y los métodos de aplicación en cobertera y las condiciones ambientales (calor y viento) en las que esta se realiza (Sommer y Hutchings, Sandars *et al.*, Holm-Nielsen, citados por Nkoa 2013).

Finalmente, podemos concluir que los residuos líquidos y sólidos de la posdigestión de las plantas de biogás pueden ser usados como fertilizantes, para lo cual la única condición es la utilización racional de estos residuos; sin embargo, se requieren más estudios para conocer el comportamiento de los distintos digestatos en los diferentes suelos del centro y el sur de Chile, así como su interacción con los distintos cultivos y sus variedades más utilizadas en esas zonas, puesto que no hay claridad en torno a su respuesta, ni tampoco de los momentos oportunos de aplicación del digestato para optimizar la productividad y reducir la contaminación del suelo y las masas de agua.

4.2.3 Referencias bibliográficas

- Al Seadi, T; Rutz, D; Prassl, H; Köttner, M; Finsterwalder, T; Volk, S; Janssen, R. 2008. Biogas handbook. Esbjerg, Dinamarca, SDU. 125 p.
- Aparcana Robles, S; Jansen, A. 2008. Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "fermentación anaeróbica" para producción de biogás. German ProfEC GmbH. 10 p.
- Babel, S; Sae-Tang, J; Pecharaply, A. 2009. Anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludge for biogas production and land application. International Journal of Environmental Science and Technology 6(1):131-140.
- Blanco, L. 2016. Análisis y caracterización de purines para la obtención de estruvita y biogás. Trabajo fin de grado en Ingeniería Química. Universitat politécnica de Valencia.
- Chamy, R; Vivanco, E. 2007. Potencial de biogás: identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. Santiago, Chile, CNE.
- Koszel, M; Lorencowicz, E. 2015. Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers. Agriculture and Agricultural Science Procedia 7:119-124.
- Lebrato, J. 1986. Obtención de energía a partir de aguas residuales de una fábrica de quesos. Trabajo Lic. Andalucía, España, Universidad de Sevilla.
- Lukehurst, CT; Frost, P; Al Seadi, T. 2010. Utilisation of digestate from biogas plants as a biofertilizer (en línea). IEA Bioenergy. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Digestate_Brochure_Revised_12-2010.pdf.
- Marculescu, C; Stan, C. 2011. Poultry processing industry waste to energy conversion. Energy Procedia 6:550-557.
- Martí Herrero, J; Pino Donoso, MA; Viquez Arias, JA. 2017. Guía para el diseño, construcción, operación, mantenimiento, seguimiento y control de plantas de biogás de pequeña y mediana escala enfocadas al sector lechero en Chile. Chile, ONUDI. 191 p.
- Ministerio de Energía (Chile). 2017. Registro de Plantas de Biogás. Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
- Montalvo, K; Castro, R; Solís, M; Aguilar, G; García; Hernández, A. 2018. Efecto de la frecuencia de defoliación y la fertilización con digestato en los componentes del rendimiento de ballico perenne (*Lolium perenne* L.). Agroproductividad 11(5):3-9.
- Morris, DR; Lathwell, DJ. 2004. Anaerobically digested dairy manure as fertilizer for maize in acid and alkaline soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis 35(11-12):1757-1771.
- Nkoa, R. 2013. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. Agronomy for Sustainable Development 34:473-492.
- Ramos, F; Jesús, H. 2017. Evaluación técnica de alternativas de pretratamiento y sacarificación de bagazo de cerveza. Tesis para optar al grado en Ingeniería Química. Universidad de Valladolid
- Risberg, K; Cederlund, H; Pell, M; Arthurson, V; Schnürer, A. 2017. Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure: chemical composition and effects on soil microbial activity. Waste Management 61:529-538.

- Robles, S. A.; Jansen, A. (2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso " Fermentación anaeróbica" para producción de biogás. German Prof EC GmbH, Lima, Perú, BM-4-00-1108, 1239.
- Salazar, F. 2018. Avances y experiencias en el manejo de purines en Chile. Seminario: Avances e innovaciones tecnológicas para el manejo de purines en predios lecheros, INIA Remehue.
- Tampere, M; Viiralt, R. 2014. The efficiency of biogas digestate on grassland compared to mineral fertilizer and cattle slurry. *Research for Rural Development* (20):89-94.
- Voelkner, A; Ohl, S; Holthusen, D; Hartung, E; Dörner, J; Horn, R. 2015. Impact of mechanically pre-treated anaerobic digestates on soil properties (en línea). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15(4):882-895. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000061>.
- WRAP (Programa de Acción sobre Residuos y Recursos, Reino Unido). 2012. Using quality anaerobic digestate to benefit crops (en línea). 11 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.nutrientmanagement.org/using-quality-digestate-to-benefit-crops/>.

5

CAPÍTULO

CAPÍTULO 5

MARCO LEGAL Y NORMATIVO DE BIODIGESTORES, BIOGÁS Y DIGESTATO EN PAÍSES SELECCIONADOS DE LATINOAMÉRICA³⁷

Cuando un país está conformando su marco normativo en materia de biodigestión, debe considerar las diversas escalas de biodigestores utilizables en su territorio. En el caso chileno, en el decreto 119 se ha observado la ausencia de **normativas específicas para los biodigestores domésticos**, que se hallan en una escala de hasta los 180 kW de potencia nominal, lo que supone demasiados requisitos para el desarrollo de sistemas de uso familiar y proyectos demostrativos y educativos de escalas productivas de emprendimientos familiares, una tónica observada en los países que siguieron la normativa bajo este patrón de categorías.

A pesar de ser un combustible más caro que el gas natural, en la actualidad el biogás soluciona un problema diferente, ya que **transforma pasivos ambientales en activos energéticos**.

Un marco regulatorio puede contribuir a la promoción del uso del biogás cuando su producción se considera un proyecto sostenible en el tiempo. En Argentina, la privatización del acceso al gas desde 1992 y hasta 2015, cuando se empezaron a promocionar proyectos extranjeros llave en mano sobre 500 kW de potencia nominal, ha impedido lograr un impacto positivo en la cadena de valor nacional, lo que conduce a **la baja sostenibilidad de los proyectos "copiar-pegar" desde el extranjero**.

En países con un alto grado de conexión de la población a redes de gas natural (Argentina: 52 %, México: 43 %, Venezuela: 43 %, Perú: 28 % y Colombia: 23 %) **los excedentes de biogás deberían poder venderse a estas redes**, dado que la producción de biogás en proyectos de 2000 a 3000 habitantes conlleva altos costos, en comparación con su aprovechamiento inmediato y complementario en redes de gas natural o GLP. Tanto el biogás como el biometano presentan escenarios económicamente favorables frente al GLP envasado o distribuido por red o a combustibles líquidos empleados en la generación eléctrica, sin necesidad de aplicar subsidios o tarifas diferenciadas.

La gran mayoría de los proyectos potenciales de biogás en territorio argentino son de baja escala (proyectos inferiores a 100 kW de potencia). Aún existen barreras de índole institucional, legal, económica, técnica y sociocultural que deben superarse para poder transformar el alto potencial de generación de biogás del sector agropecuario argentino en proyectos concretos de generación de energía para fines comerciales o autoconsumo. Se deben establecer **normas específicas de homologación de artefactos y equipos para uso con biogás**, así como de condiciones operativas y de seguridad que el biogás debe cumplir, desde su producción hasta su consumo.

³⁷ Autores: Rodolfo Silva, Alexandra Salinas, Luis Cepero Casas, José A. Guardado, José Luis Betelu, Federico Vargas y Adriano Ferrarez.

La estructura gubernamental requerida para implementar las energías renovables y aprovechar la biomasa residual debe incluir presupuestos, indicadores y metas **que deben ser revisados permanentemente**. Se sugiere establecer **compromisos entre los diversos sectores para mitigar los efectos negativos de los residuos sólidos y líquidos en el ambiente**.

En Colombia, a través del Conpes 3874 y la *Guía del sector porcícola*: DS 2981 (2013) RSU, se pretende aprovechar la gestión diferencial.

La tasa cero para inversiones que promueven iniciativas de sostenibilidad en el ámbito gubernamental es un camino que ayuda a instaurar un mercado de sistemas y accesorios para la generación y el uso del biogás y el digestato.

Con respecto a la gestión de la FORSU, resulta esencial elaborar e implementar nuevas normativas que desarrollen medidas más específicas y coercitivas para su adecuado tratamiento mediante biodigestores, así como para la regulación y el aprovechamiento del biogás y el biometano. Estas deberán considerar la debida transversalidad con las leyes y normas vigentes para coordinar su adecuada implementación.

La segregación de los residuos en su lugar de origen es crucial para su tratamiento eficiente, así como para la producción de biofertilizantes libres de contaminantes. Para ello, la participación ciudadana y la **recolección municipal selectiva son indispensables**. Incentivar por medio de convenios público-privados la participación del sector privado en proyectos de separación, reutilización y reciclaje de desechos es esencial. Este trabajo en general debe ir en paralelo con una agenda que considere formalmente a los sindicatos de recicladores de base, “pepenadores”, “catadores” y trabajadores de limpieza en la red de gobernanza, para que sean reconocidos por su rol histórico en este espacio y sean remunerados adecuadamente.

Es importante desarrollar políticas educativas de concientización sobre la adecuada disposición y tratamiento de los residuos, así como nuevas capacidades y competencias en la materia. En este sentido, se debe dar un reconocimiento a los individuos que hayan logrado desarrollar tales capacidades. Otras acciones consideradas como metas esenciales son: reducir la generación de residuos, conocer y rediseñar la fracción rechazada para su reducción, desarrollar una cadena de valor, estimular el establecimiento de agencias de financiamiento y expandir las redes de distribución de productos.

5.1 Estado actual de las políticas nacionales de tratamiento de la FORSU a través de la DA en Brasil y México

Autor: Rodolfo Daniel Silva Martínez

i. Introducción

La necesidad perentoria de implementar y difundir el uso de biodigestores como tratamiento adecuado de la FORSU surge de los impactos ambientales, sociales y de salud pública causados por las prácticas tradicionales de disposición de residuos orgánicos en tiraderos y rellenos sanitarios, las cuales conllevan también un ineficiente uso de las materias primas, la energía y las zonas urbanas.

En Brasil en 2018 se generaron 79 000 000 t de RSU (ABRELPE 2019) y, actualmente, en el 60 % de los municipios los residuos sólidos se colocan en lugares impropios, principalmente en tiraderos o vertederos (sitios que si bien son legales, carecen de las condiciones para gestionar adecuadamente los lixiviados y los RSU) (Zago y Barros 2019).

En México, donde en 2019 se generó un poco más de 44 000 000 t de residuos sólidos (SEMARNAT 2019), existen aproximadamente 238 rellenos sanitarios y 1643 tiraderos a cielo abierto, en muchos de los cuales la disposición de los residuos es inadecuada y representa un riesgo para la salud de la población y el medio ambiente (SEMARNAT 2019). En ambos países, del total de RSU generados, la fracción orgánica alcanza un poco más del 50 % (MMA 2012, SEMARNAT 2015), lo que representa un potencial significativo en términos de tratamiento adecuado, producción de bioenergía y reciclaje de nutrientes en condiciones controladas.

Por otro lado, en ambos países se han instalado hasta el momento cientos de biodigestores de mediana y gran escala para el tratamiento de diversos sustratos y efluentes orgánicos; no obstante, la gran mayoría se halla en el sector rural y son pocos los casos en que la FORSU se procesa con éxito a través de este método (Colturato et al. 2017, Gutiérrez 2018).

En ambos países el tratamiento de estos residuos mediante biodigestores ya tuvo sus primeras manifestaciones en los marcos legislativos respectivos, con la promulgación de varias leyes y planes gubernamentales que recomiendan o incentivan la implementación de estas tecnologías. Aunado a esto, varios esfuerzos se dirigen a formular nuevas normativas nacionales, ya que aún hay brechas legales, financieras, operativas y de gestión que inhiben el tratamiento adecuado de la FORSU a una tasa significativa, siendo los rellenos sanitarios y tiraderos las prácticas más comunes para disponer estos residuos.

A continuación se presenta un estudio de caso de Brasil y México, basado en el análisis del estado actual de sus respectivos marcos legislativos en relación con el tratamiento de la FORSU por medio de tecnologías de DA, a fin de descubrir sus limitaciones y aciertos y de compartir los logros alcanzados y las lecciones aprendidas con otros países de ALC. Para ello se llevó a cabo un análisis estructural a través del método de investigación de archivo, dirigido a clasificar y organizar la información disponible (ilustración 77).

Ilustración 77. Planta de tratamiento de residuos de restaurantes, frutas y otros productos orgánicos ubicada en Foz de Iguazú, Brasil, CIBiogás



Fuente: Fotografía donada por el Centro Internacional de Energías Renovables, CIBiogás.

5.1.1 Políticas nacionales relacionadas con el tratamiento de la FORSU mediante la DA

Tanto en Brasil como en México se han desarrollado un marco legislativo, programas y estrategias que atienden el tratamiento de la FORSU por medio de biodigestores, así como la producción de bioenergía (p. ej., biocombustibles y/o energía eléctrica o calorífica). A continuación se presenta una síntesis de estas políticas, así como su análisis para determinar el potencial actual para la adecuada implementación de biodigestores en ambos países.

5.1.1.1 Políticas sobre la gestión integral de la FORSU

En Brasil, conforme a lo dispuesto en la Política Nacional de Residuos Sólidos, promulgada en 2010, únicamente los materiales que carecen de viabilidad técnica y económica de aprovechamiento deben ser destinados a rellenos sanitarios. Claramente, esto excluye la fracción orgánica (entre los varios materiales reciclables y aprovechables que terminan en dichos rellenos), lo que evita su pérdida y fomenta la reducción de los impactos sociales y ambientales asociados a su disposición inadecuada. Además, entre los objetivos de esta política se encuentran la adopción, el desarrollo y el fomento del uso de sistemas y tecnologías para el aprovechamiento de los residuos sólidos.

Sin embargo, en esta política se pone poco énfasis en la implementación de biodigestores y es hasta un año después, con la elaboración del Plan Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), cuando se genera una directriz para el aprovechamiento energético de la FORSU por medio del biogás generado en los biodigestores, así como de procesos de compostaje. Igualmente, se menciona la utilización del digestato resultante como compuesto orgánico con fines agrícolas.

En el PNRS también se incluye una estrategia para disponer de recursos financieros e incentivos fiscales para la implementación de nuevas unidades de compostaje, rellenos sanitarios y biodigestores. Además, se desarrolla una estrategia para llevar a cabo actividades de concientización social en torno a la segregación adecuada de los residuos en su origen (segregación diferenciada en origen), así como de difusión de conocimientos acerca de la biodigestión y la producción de biogás.

Aunado a estas políticas con respecto al adecuado tratamiento de residuos y saneamiento, también se cuenta con el Plan Nacional de Saneamiento Básico 2019, en el que se establecen estrategias para la gestión de los servicios de saneamiento básico, que promueven una mayor eficiencia de los sistemas sanitarios a través del aprovechamiento energético del biogás. Además, en él se propone ampliar la gestión municipal selectiva, el reciclaje y el aprovechamiento energético de la FORSU, estableciendo como meta el tratamiento del 2.8 % de estos residuos mediante compostaje o DA al 2023, y del 10.4 % al 2033, también con el propósito de cumplir con las metas de reducción de emisiones de GEI.

En la legislación federal y en la de algunos estados de México (México, Nuevo León y Puebla, entre otros), se contempla el manejo adecuado de los residuos. En la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos 2018 se realiza una clasificación de los residuos orgánicos e inorgánicos con el objeto de facilitar su segregación, así como su disposición en rellenos sanitarios o confinamientos controlados.

En dicha ley se especifica que en las normas mexicanas se establecerán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que se pueden disponer en ellas; además, se planteará en qué casos se puede aprovechar el biogás generado. Asimismo, el 18 de enero de 2021 se publicó la reforma a esta ley, en la cual se estipula de manera puntual que los residuos orgánicos sólidos se pueden utilizar en la recuperación de energía eléctrica, lo que constituye una modificación clave.

De conformidad con lo anterior, la Ley General de Cambio Climático 2018 promueve el aprovechamiento del potencial energético contenido en los residuos para mitigar la emisión de GEI por medio de la gestión integral de los residuos, así como generar energía. Con ello, se estipula la reducción de emisiones en el sector de los residuos, a través del desarrollo, la construcción y la instalación de infraestructura adecuada (biodigestores) en centros urbanos de más de 50 000 habitantes para minimizar y valorizar los residuos sólidos urbanos.

En concordancia con lo anterior, en la Estrategia Nacional de Cambio Climático 2015 se consideran acciones más concretas para impulsar la participación del sector privado en proyectos de separación, reutilización y reciclaje de desechos, así como el desarrollo de plantas de biogás para el manejo integral de los residuos sólidos.

Entre los problemas identificados en la gestión de residuos en México se incluye el no cobro de tasas mínimas por la disposición de la FORSU en los tiraderos o rellenos sanitarios, lo que representa la pérdida de contribuciones dirigidas a la implementación de programas y tecnologías para su tratamiento adecuado. Otro problema mayor lo constituye la falta de una organización eficiente en varios de los sindicatos de recolectores informales “pepenadores” y trabajadores de limpieza, ya que muchas veces surgen trabas para que se automaticen o mejoren los sistemas de gestión de RSU con el reconocimiento de los recicladores de base.

5.1.2 Políticas sobre bioenergía

En Brasil el desarrollo de acciones políticas de implementación del biogás y el biometano en el sector energético para su optimización se fija de conformidad con el MME, con una visión de largo, mediano y corto plazos (CIBiogas *et al.* 2021a) de la siguiente manera:

Como política de largo plazo, el Plan Nacional de Energía 2050 (PNE 2050) presenta una visión de los próximos 30 años, basada principalmente en dos aspectos: 1) los lineamientos estratégicos del rumbo energético de Brasil y 2) la transformación de estos lineamientos en acciones tangibles, con recomendaciones para que las agencias gubernamentales actúen según corresponda. El Plan Decenal de Expansión de Energía (PDE) 2030 es el plan energético decenal a mediano plazo derivado del PNE 2050, mediante el cual los programas de acción y las nuevas políticas con respecto a proyectos de biogás se están convirtiendo en una realidad. En consecuencia, para la implementación de dichos proyectos en el corto plazo existen principalmente cuatro oportunidades: 1) una nueva ley de gases, 2) la Política Nacional de Biocombustibles (RenovaBio), 3) un aumento de fuentes intermitentes y 4) los pasillos verdes, todo lo cual se describe a continuación:

Largo plazo: PNE 2050

El PNE 2050 contiene las directrices que establecen el rumbo que seguirá el país en el sector energético. Además, desarrolla los lineamientos y la estrategia del Gobierno para la

consolidación del sector energético en los próximos años. Con base en este documento, se determina cuáles son las políticas consideradas por los diversos institutos para la implementación de la estrategia energética nacional, así como el seguimiento y la integración de nuevas soluciones para el mercado del uso energético. También se evalúan los atributos de las diversas fuentes de energía para definir los beneficios que estas pueden ofrecer al país. Las cinco pautas derivadas del PNE 2050 son:

1. El reemplazo gradual de productos derivados del petróleo;
2. La creación y el desarrollo de biotecnologías;
3. El aprovechamiento energético de los desechos agrícolas por medio de la producción descentralizada de biogás y biometano;
4. La promoción de condiciones para la sustitución del diésel en sistemas aislados; y
5. El desarrollo eficiente del mercado y la infraestructura del gas natural.

En estos planes se destaca la producción de metano en los próximos años.

Mediano plazo: PDE 2030

En 2017 el PDE 2030 contempló al biogás por primera vez en sus objetivos de expansión energética eléctrica. Asimismo, incluyó el aprovechamiento energético del biogás, considerando que la mayor producción de este se deriva del uso de residuos agrícolas, principalmente de la caña de azúcar, a través de la biodigestión de vinazas y revoques. Además, considera varios otros sustratos agroindustriales y urbanos para su potencial utilización en una producción significativa de biogás.

En este plan también existen algunas condiciones que representan la potencial expansión del biometano en la matriz energética, p. ej., la expansión de la agricultura, con un aumento del 3.6 % en las actividades; y un uso más intenso de camiones de carga pesada, entre otros. Este plan también presenta las medidas de mitigación del Gobierno federal, entre las que se incluyen:

1. Un incremento en el uso de biocombustibles;
2. La ampliación de fuentes renovables para la generación de electricidad; y
3. Un aumento en las medidas de eficiencia energética.

El biogás y el biometano desempeñan un papel fundamental en este proceso de mitigación (CIBiogás *et al.* 2021a). Además, el MME propuso el lanzamiento del Programa Nacional de Hidrógeno, que incentiva la producción de hidrógeno verde y mediante el cual se pretende hacer un mejor aprovechamiento de la energía contenida en biocombustibles como el biogás y el etanol.

Corto plazo: nueva Ley del Gas Natural, la RenovaBio, aumento en las fuentes intermitentes y pasillos verdes

1) *Nueva Ley del Gas Natural 2021.* En esta ley se presenta el biogás y el biometano como equivalentes al gas natural y se establece que estos podrán tener un tratamiento similar siempre que cumplan con las especificaciones establecidas por la ANP. Trae consigo varias

oportunidades, no solo para aumentar el suministro de energía térmica, sino también para disminuir la intensidad de las emisiones de carbono.

Asimismo, esta ley prevé emprendimientos para la inserción del biometano, tales como: 1) la reducción del riesgo regulatorio, 2) soluciones emergentes en sectores industriales estratégicos (p. ej., el de biofertilizantes), 3) importantes inversiones en infraestructura y 4) la posibilidad de incluir el biogás en el Esquema de Incentivo Especial para el Desarrollo de Infraestructura (CIBiogás *et al.* 2021a).

2) La *RenovaBio*. En 2017 se instituyó la política *RenovaBio*, que establece metas nacionales anuales de descarbonización para el sector de los biocombustibles, a fin de contribuir al cumplimiento de los compromisos de Brasil en el Acuerdo de París, además de incentivar un aumento del 6 % al 18 % en la participación de los biocombustibles en la matriz energética del país (Nosso Foco Preservar Você 2017), particularmente del bioetanol, el biodiésel y el biogás. De acuerdo con este plan, el biometano tiene el puntaje de eficiencia energética más alto entre los biocombustibles y el mayor volumen promedio elegible por biocombustible; no obstante, cuenta con muy pocas certificaciones, debido a que hay muy pocas empresas de producción de metano registradas por la ANP.

3) El aumento en las fuentes intermitentes. El biogás tiene la ventaja de suplir la intermitencia de fuentes eólicas y solares, junto con la expectativa de una mayor porción de autoproducción de energía, en comparación con otras fuentes renovables.

4) Pasillos verdes. Se considera al biometano una alternativa para avanzar en los pasillos verdes, lo que contribuye a la producción de energía renovable en áreas estratégicas.

Otra iniciativa que se está llevando a cabo en apoyo al desarrollo del sector del biogás y de otras energías renovables es el consorcio denominado Programa de Energía para Brasil, enfocado en innovaciones regulatorias y en políticas de mercado y tecnológicas en varios sectores de la energía renovable, incluido el de recuperación de energía a partir de desechos y efluentes. Financiado por el Gobierno del Reino Unido, une a este país y a Brasil para colaborar en el uso de energías renovables y tecnologías limpias (CIBiogás *et al.* 2021a). En el marco de este programa se espera que la incineración, así como otras formas de valorización térmica (p. ej., la pirólisis y la gasificación), no se consideren tecnologías limpias, debido al riesgo permanente de emisión de subproductos tóxicos o inseguros que amenaza la salud del planeta.

En México, por medio de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos 2008, se busca impulsar el desarrollo sostenible y el uso eficiente de los bioenergéticos, a través de la Comisión de Bioenergéticos, formada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (ahora la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural), la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Se establece que estas secretarías, junto con los gobiernos estatales, promoverán la creación de infraestructura para la producción de bioenergéticos, creando incentivos para el desarrollo de esta industria.

La Ley de Transición Energética de 2015 fomenta la producción de electricidad a partir de bioenergía, entre otras fuentes sostenibles. La Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en

Materia Energética 2014 establece que la Comisión Nacional Reguladora de Energía regularizará y promoverá el desarrollo eficiente del transporte, el almacenamiento y la distribución de bioenergéticos; sin embargo, la actual reforma a la Ley de la Industria Eléctrica de marzo de 2021, recién aprobada por las cámaras del Congreso, no presta suficiente atención a la inclusión de fuentes de bioenergía que contribuyan de manera relevante a la matriz energética del país.

Por otro lado, en 2020 surgió la *Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios*, mediante la cual se desarrollan acciones que inciden en la regulación y la promoción de las tecnologías del biogás y se fomenta el tratamiento de residuos sólidos rurales por medio de biodigestores, impulsando la adquisición y el uso de bioenergéticos (como etanol, biodiesel y biogás) en empresas del sector público y evaluando la creación de programas de financiamiento y estímulos para incentivar el aprovechamiento energético de los RSU por parte del sector privado; no obstante, el biogás aún no está regulado en el país, lo que dificulta su desarrollo.

5.1.3 Otras leyes, estrategias y decretos complementarios

En Brasil se han emitido algunos otros decretos y regulaciones estatales en relación con el aprovechamiento y la calidad del biogás y el biometano. En la región centro-sur del país el biogás es un recurso ampliamente aprovechado en el sector agroindustrial. Estados como Goiás, Paraná, Río de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina y São Paulo cuentan con políticas de biogás y biometano, en cuyos textos se hace referencia a la problemática de los RSU.

Por ejemplo, en el Decreto n.º 58 659, emitido en 2012 en São Paulo, se regula el porcentaje de biometano en relación con el gas canalizado en dicho estado. Además, a través del Programa Paulista de Biogás, emitido ese mismo año, se pretende incluir definitivamente el biogás en la matriz energética estatal, mientras que en la Deliberación n.º 744/2017 se disponen las condiciones de distribución del biometano en la red de gas estatal. En la actualidad el estado de Ceará cuenta con la única planta del país que inyecta el biometano a la red de gas canalizado (Decreto n.º 32 600).

En el ámbito nacional, en 2015 se decretó la Resolución ANP n.º 8, en la que se especifica la calidad del biometano derivado de productos y residuos orgánicos agrosilvopastoriles y comerciales. Posteriormente, se emitió la Resolución ANP n.º 685/2017, que trata sobre el control de calidad y especificaciones del biometano proveniente de rellenos sanitarios y PTAR. Ambas resoluciones incluyen las especificaciones y regulaciones para inyectar biometano en la red de gas natural. Actualmente, la ANP está revisando la propuesta para unificar ambas resoluciones en una sola norma (CIBiogás *et al.* 2021b).

Más recientemente, la colaboración entre varios institutos y organizaciones nacionales e internacionales ha permitido el desarrollo de dos nuevas convocatorias públicas para la disseminación de tecnologías de biogás en los mercados locales: una para la tropicalización de tecnologías y la otra para la consolidación de unidades demostrativas de biogás y biometano (CIBiogás *et al.* 2021a).

- 1) **Programa de tropicalización.** El Programa de Tropicalización Tecnológica está vinculado al Proyecto GEF Biogás Brasil (del FMAM), liderado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovaciones, implementado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial y financiado por el FMAM (CIBiogás *et al.* 2021c). Dicho proyecto tiene como objetivo promover la cooperación entre empresas brasileñas y extranjeras para identificar oportunidades que satisfagan las demandas del mercado local. La finalidad del Programa es involucrar a los actores nacionales e internacionales en la implementación de acciones de fomento del desarrollo económico y la innovación tecnológica, dirigidas a la cadena de valor del biogás en Brasil.

El Proyecto GEF Biogás Brasil ofrece soluciones para apoyar a las empresas y asesorar a los gobiernos locales en el desarrollo de políticas públicas, entre ellas, el respaldo a la integración entre empresas y financistas, el establecimiento de nuevos modelos de negocios, la impartición de cursos gratuitos, la provisión de información estratégica y la promoción de la modernización de leyes y políticas sobre gestión de RSU. Entre los beneficios que ofrece se incluyen la diversificación de la matriz energética, la mitigación de los efectos del cambio climático, la optimización del uso de los recursos, la implementación de tecnologías nacionales y el fortalecimiento tecnológico.

- 2) **Selección de plantas de biogás para convertirlas en unidades de demostración.** Con esta convocatoria pública se realiza una selección de las plantas de tratamiento de biogás que recibirán apoyo directo, que incluye inversión incremental y asistencia especializada, mediante su incorporación en el Proyecto GEF Biogás Brasil como unidades de demostración. Su finalidad es proporcionar recursos para la inversión en servicios, procesos y equipos para promover la innovación y/o mejoras en las plantas de biogás en los ámbitos de las aplicaciones energéticas y del uso del digestato como biofertilizante.

En México, en 2014, como resultado de la iniciativa de la SENER y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), surgen los centros mexicanos de innovación en energía, entre cuyos objetivos se incluye la generación de bioenergía por medio de tecnologías de DA.

Otras leyes complementarias son la reciente Política Cero Residuos de la SEMARNAT (SEMARNAT 2019), dirigida a evitar el desperdicio de alimentos y a aprovechar el potencial orgánico y energético de estos residuos, así como la normativa NOM-083-SEMARNAT-2003, que está siendo reformada y que se enfoca en el manejo y la disposición de residuos en rellenos sanitarios. Cabe señalar que actualmente se está implementando una nueva ley federal sobre economía circular, con la cual se pretende generar herramientas para el desarrollo de programas en el plano municipal, con el fin de considerar los residuos como materiales reutilizables y no como basura.

Actualmente el Consejo Nacional de Biogás AC impulsa un programa para el desarrollo de las capacidades técnicas y administrativas de los actores relevantes de la cadena de valor del sector del biogás, en conjunto con la GIZ en México. En este programa de cursos técnicos sobre diversas temáticas en materia de biogás, a través de la colaboración y soluciones técnicas, se

pretende lograr la incidencia política y regulatoria sobre una mayor diseminación de estas tecnologías en el país (GIZ 2021).

En las metas para cumplir con las contribuciones determinadas a nivel nacional del Acuerdo de París igualmente se promueve el tratamiento biológico de la FORSU para disminuir las emisiones de GEI en ambos países. En la actualidad en estas dos naciones están en marcha otras iniciativas para la elaboración de nuevas normativas nacionales y locales específicas para la regulación y el uso del biogás y el biometano.

5.1.4 Conclusiones y recomendaciones

En Brasil y México existe a la fecha un marco legislativo coherente, compuesto por varias leyes, estrategias y programas que promueven la implementación de biodigestores para el adecuado tratamiento y el aprovechamiento energético de la FORSU; sin embargo, estos mandatos y regulaciones son generales y poco atendidos, ya que, en su mayoría, esta fracción es enterrada, quemada o enviada a vertederos, sin desarrollar considerablemente su potencial energético y de materiales (p. ej., biofertilizantes), lo cual le da continuación a estas falsas soluciones.

Son pocos los casos en los que se ha logrado la captura de metano (y su consiguiente aprovechamiento energético) desde rellenos sanitarios: 9 en Brasil (Barbosa-Nascimento *et al.* 2019) y 8 en México (GIZ *et al.* 2018). Por lo tanto, los residuos orgánicos (la FORSU) aún no se contemplan determinadamente en normativas particulares y aún se carece de acciones específicas o estrategias puntuales por ser implementadas en el ámbito nacional para su tratamiento y descarte adecuados.

Dos de las políticas destacables en la materia y que podrían servir con fines de aprendizaje son: el PNRS de Brasil, en el que ya se genera una directriz para el aprovechamiento energético de la FORSU mediante biodigestores, y la *Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios* de México, por medio de la cual se desarrollan acciones en bioenergía que inciden en la promoción de tecnologías de biogás para el tratamiento de la FORSU.

Según lo anterior, en ambos países, para desarrollar el potencial de tratamiento adecuado de la FORSU a través de la DA, se considera que los gobiernos deben incentivar y crear las condiciones para:

- Elaborar e implementar nuevas normativas que incluyan medidas más específicas y coercitivas para el adecuado tratamiento de la FORSU mediante biodigestores, así como la regulación y el aprovechamiento del biogás y el biometano. Estas deben considerar la transversalidad correspondiente con las leyes y normativas en vigor para coordinar su adecuada implementación.
- Segregar los residuos en su origen, lo que resulta crucial para su tratamiento eficiente en el biodigestor, así como producir biofertilizantes libres de contaminantes, para lo cual la participación ciudadana y la recolección municipal selectiva son indispensables.
- Por medio de convenios público-privados, incentivar la participación del sector privado en proyectos de separación, reutilización y reciclaje de desechos, así como el desarrollo de biodigestores.

- Lograr contribuciones mayores y significativas como resultado de la disposición de residuos en tiraderos y rellenos sanitarios, dirigidas a inversiones en tecnologías de biodigestión.
- Incluir formalmente a los sindicatos de recicladores de base, “pepenadores”, “catadores” y trabajadores de limpieza en la red de gobernanza para que sean reconocidos y remunerados adecuadamente.
- Desarrollar políticas educativas de concientización sobre la adecuada disposición y tratamiento de los residuos, así como de generación de nuevas capacidades y competencias y de reconocimiento a los individuos que las hayan desarrollado.
- Otras acciones consideradas como esenciales son: cumplir con las metas de reducción de residuos, conocer y rediseñar la fracción rechazada para su disminución, desarrollar una cadena de valor, estimular la creación de agencias de financiamiento y ampliar las redes de distribución de productos.

Los biodigestores instalados en Curitiba (CS Bioenergía 2019) y Foz de Iguazú (Projeto de biometano feito por Itaipu dá certo e pode ser replicado por empresas privadas 2019) en Brasil, y en Atlacomulco y Milpa Alta (GIZ *et al.* 2018) en México demuestran la viabilidad técnico-económica de estos proyectos en la región, los cuales pueden servir como pauta para próximos proyectos (ilustración 78).

Ilustración 78. Planta de tratamiento de la FORSU, aguas residuales y residuos cárnicos en Atlacomulco, México. Asociación Mexicana de Biomasa y Biogás A. C. (AMBB).



Fuente: Fotografía donada por la Asociación Mexicana de Biomasa y Biogás, A.C.

Los beneficios obtenidos de la utilización de biodigestores en el adecuado tratamiento de la FORSU son diversos y ampliamente divulgados; no obstante, aún se deben enfrentar varios retos técnicos, financieros y políticos, lo que demanda acciones más específicas para la implementación de esta tecnología.

5.1.5 Colaboración y agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con la colaboración de Alessandro Sanches Pereira, del Instituto 17, São Paulo, Brasil; Abel Clemente Reyes, de la AMBB, Ciudad de México; y Marcela Vincoletto Rezende, de la ABILOGÁS, São Paulo, Brasil; así como con el apoyo del CONACYT de México.

Agradecemos igualmente a la Dra. Leidiane Ferronato Mariani, a la Prof.^a María Fernanda Gómez Galindo y al Prof. Antonio Sampaio Baptista por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

5.1.6 Referencias bibliográficas

- ABRELPE (Asociación Brasileña de Empresas de Limpieza Pública y Residuos Especiales). 2019. Brasil produz mais lixo, mas não avança em coleta seletiva (en línea). Consultado el 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://lixoforadagua.com.br/brasil-produz-mais-lixo-mas-nao-avanca-em-coleta-seletiva/>.
- Barbosa-Nascimento, MC; Pimenta-Freire, E; Souza-Dantas, FA; Bortoletto-Giansante, M. 2019. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental no Sistema Brasileiro de Ciência, Tecnologia e Inovação 24(1):143-55.
- CIBiogás (Centro Internacional de Energías Renovables-Biogás, Brasil); EMBRAPA (Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria); UCS (Universidad de Caixas do Sul, Brasil); Sbera. 2021a. Painel 1: panorama biogás no Brasil: 3.º Fórum Sul Brasileiro de Biogás e Biometano (en línea, teleconferencia). Brasil. 2 h. 4 seg., son., color. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=vrrlr05c0gE>.
- CIBiogás (Centro Internacional de Energías Renovables-Biogás, Brasil); EMBRAPA (Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria); UCS (Universidad de Caixas do Sul, Brasil); Sbera. 2021b. Painel 5: biometano – desafios e oportunidades: 3.º Fórum Sul Brasileiro de Biogás e Biometano (en línea, teleconferencia). Brasil. 2 h. 18 min. 16 seg., son., color. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=khahRF0HP64>.
- CIBiogás (Centro Internacional de Energías Renovables-Biogás, Brasil); ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, Austria); ITAIPU BINACIONAL. 2021c. Lançamento do Programa de Tropicalização do Projeto GEF Biogas Brasil (en línea, teleconferencia). Brasil. 1 h. 12 min. 52 seg., son., color. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=Fn0fPQp600A>.
- Colturato, LFDB; Gomes, FCSP; Seraval, TA; Colturato, TDB. 2017. Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de resíduos sólidos urbanos com produção de biogás. Brasília, Brasil, PROBIOGÁS. 124 p. (Série Aproveitamento Energético de Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos, n. 2).
- CS Bioenergia. 2019. CS Bioenergia recebe autorização para operar a primeira usina de geração de energia com resíduos orgânicos (en línea). Paraná, Brasil. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://csbioenergia.com.br/cs-bioenergia-recebe-autorizacao-para-operar-a-primeira-usina-de-geracao-de-energia-com-residuos-organicos/>.
- GIZ (Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo, México). 2021. Consejo Nacional de Biogás inicia capacitaciones sobre oportunidades de negocio en aprovechamiento energético de residuos sólidos en México (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://cooperacionenergiasustentable.mx/consejo-nacional-de-biogas-inicia-capacitaciones/>.

GIZ (Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo, México); SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México); SENER (Secretaría de Energía, México). 2018. Proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos urbanos en México: plantas de producción de energía en hornos cementeros, biodigestores, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales. Ciudad de México (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.giz.de/en/downloads/giz2019-ES-EnRes-Proyectos-de-Aprovechamiento.pdf>.

Gutiérrez, JP. 2018. Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030. Morelia, México, RMB. 20 p.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente, Brasil). 2012. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasilia.

Nosso Foco Preservar Você. 2017. RenovaBio: conheça este projeto de energias renováveis (en línea, video). Brasil. 4 min. 55 seg., son., color. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=pqFgfWkRvYc>.

Projeto de biometano feito por Itaipu dá certo e pode ser replicado por empresas privadas (en línea). 2019. PetroNotícias, Brasil; 25 ene. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://petronoticias.com.br/projeto-de-biometano-feito-por-itaipu-da-certo-e-pode-ser-replicado-por-empresas-privadas/>.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México). 2015. Informe de la situación del medio ambiente en México 2015: compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Ciudad de México. 470 p.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México). 2019. Visión nacional hacia una gestión sustentable: cero residuos. Ciudad de México. 27 p.

Zago, VCP; Barros, RTV. 2019. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. Engenharia Sanitária e Ambiental 24(2):219-228.

5.2 Marco legal y normativo en Colombia: política pública en torno a la DA

Autora: Alexandra Salinas Salinas

5.2.1 Normativa sobre las energías renovables en Colombia

En Colombia el Gobierno nacional definió directrices para el desarrollo y la utilización de tecnologías basadas en biodigestores. A continuación se presenta una síntesis del marco legal en vigor relativo a las energías renovables en el país.

A través de la Ley de Servicios Públicos (Ley 142 de 1994) y de la Ley Eléctrica (Ley 143 de 1994) se definieron los lineamientos generales para la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica, además del marco legal para el desarrollo de la regulación sectorial por parte de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). Dentro de la Ley 143 de 1994 se logra la articulación de instituciones como la UPME, la CREG, la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía y el MME, a fin de coadyuvar con la diversificación energética y el desarrollo sostenible en apoyo al sector rural colombiano, promoviendo las metodologías que en este proyecto se pretende desarrollar y la investigación en centros educativos y otros agentes públicos y privados para plantear

soluciones convenientes en términos económicos, basadas en la gestión de residuos (manejo de residuos sólidos y peligrosos, emisiones atmosféricas, ruido y vertimiento de aguas residuales, definido mediante el Documento CONPES 2750 de 1994), así como eficientes, dejando de lado los combustibles fósiles y aprovechando los recursos hídricos, solares y eólicos.

Además, se establece que dichas entidades deben planear la utilización de las fuentes no convencionales de energía, el análisis tecnológico, la regulación del sector eléctrico en general, la ejecución de proyectos en sitios aislados y la adopción de planes sustentados en lo siguiente:

Se define en el artículo 30 que:- “la presentación y publicación de las iniciativas populares legislativas y normativas ante las corporaciones públicas. Una vez certificado por la Registraduría del Estado Civil correspondiente, el cumplimiento de los requisitos de una iniciativa legislativa y normativa, exigidos por esta ley, su vocero, presentará dicho certificado con el proyecto de articulado y la exposición de motivos, así como la dirección de su domicilio y la de los promotores, ante la Secretaría de una de las Cámaras del Congreso de la República o de la Corporación pública respectiva, según el caso”. (Ley 134, 1994, p.30).

En términos de la gestión de residuos sólidos, Colombia ha venido articulando esta temática con el modelo económico de producción y consumo lineal³⁸. En 1997 el Ministerio del Medio Ambiente (actualmente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) expidió la Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, Documento CONPES 3874 de 2016, por medio del cual define los lineamientos para un adecuado manejo de los residuos sólidos en el país. Igualmente, el Departamento Nacional de Planeación, a través del Documento CONPES 3530: *Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de residuos sólidos*, formuló lineamientos y estrategias de políticas adicionales para la optimización de las estrategias técnicas, financieras, legales, institucionales, ambientales y comerciales relacionadas con la prestación del servicio público de aseo.

En el marco de la Ley 629 de 2000 el país se adhirió al Protocolo de Kioto de la CMNUCC, cuyo objetivo era reducir las emisiones de GEI y en el cual se daba prioridad a las energías renovables como una opción estratégica para Colombia.

Mediante la Ley 697 de 2001 se declaró el uso racional y eficiente de la energía (URE) como un asunto de conveniencia nacional. Adicionalmente, se creó el Programa Nacional de Uso Racional de la Energía, por medio del cual se promueve la eficiencia energética y otras formas de energía no convencionales, tal como se señala en los artículos 1 y 2 de dicha ley:

Artículo 1. Declárase el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

³⁸ Este se define como un modelo extractivista, según el cual la materia prima se extrae y se utiliza para fabricar bienes y luego se dispone de ella.

Artículo 2. El Estado debe establecer las normas e infraestructura necesarias para el cabal cumplimiento de la presente ley, creando la estructura legal, técnica, económica y financiera necesaria para lograr el desarrollo de proyectos concretos, URE, a corto, mediano y largo plazo, económica y ambientalmente viables asegurando el desarrollo sostenible, al tiempo que generen la conciencia URE y el conocimiento y utilización de formas alternativas de energía (Ley 697 de 2001).

A través de la Ley 788 de 2002 se estableció una exención al impuesto de renta sobre los ingresos derivados de la venta de energía eléctrica generada a partir de residuos agrícolas, fuentes eólicas y biomasa, para lo cual se exige: “El cumplimiento de 2 requisitos: tramitar certificados de emisión de CO₂ y, que al menos 50 % de los recursos obtenidos por la venta de dichos certificados sean invertidos en obras de beneficio social en la región donde opera el generador” (Cendales 2011:2).

Mediante la Ley 1259 de 2008 se crea e implementa el Comparendo Ambiental como instrumento de cultura ciudadana en torno al adecuado manejo de los residuos sólidos y escombros, por medio del cual se previene la afectación al medio ambiente y la salud pública a través de sanciones pedagógicas y económicas a todas aquellas personas naturales o jurídicas que infrinjan la normativa en vigor en materia de residuos sólidos, y se fomentan los estímulos a las buenas prácticas ambientalistas. Adicionalmente, se brinda la información requerida para el manejo de los desechos generados por el biodigestor y su disposición final, los cuales son tratados como vertimientos en la normativa actual.

Mediante la Resolución MME 18-0919 de 2010, el MME definió el Plan de Acción 2010-2015 y extendió su vigencia hasta junio de 2016, para la adopción del Plan de Acción 2016-2020.

Por medio del artículo 82: “Propósitos del aprovechamiento” del Decreto n.º 2981 de 2013 se busca “Racionalizar el uso y consumo de las materias primas provenientes de los recursos naturales. Recuperar valores económicos y energéticos que hayan sido utilizados en los diferentes procesos productivos”, así como “Aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios al reducir la cantidad de residuos a disponer finalmente en forma adecuada. Reducir el caudal y la carga contaminante de lixiviados en el relleno sanitario, especialmente cuando se aprovechan residuos orgánicos”. De este modo, se fomenta el uso energético de los residuos de alto contenido orgánico y una cantidad reducida de estos para su disposición en los rellenos sanitarios.

El Gobierno nacional adquirió compromisos en términos de energías renovables, gestión eficiente de la energía y reducción de GEI a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables, mediante la Ley Otorgada por el Congreso de la República 1665 de 2013 en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009. En su artículo 3 se define lo siguiente:

Artículo 3. Definición: En el presente Estatuto, por “energías renovables” se entenderán todas las formas de energía producidas a partir de fuentes renovables y de manera sostenible, lo que incluye, entre otras:

1. La bioenergía.
2. La energía geotérmica.
3. La energía hidráulica.

4. La energía marina, incluidas la energía obtenida de las mareas y de las olas, la energía térmica oceánica.
5. La energía solar.
6. La energía eólica (Ley 1665 de 2013).

Actualmente el país incentiva la utilización y el fomento de la inversión, la investigación, el desarrollo, la regulación y la integración de las energías renovables no convencionales en el Sistema Energético Nacional (MME 2010), tales como las procedentes de la biomasa, en particular el biogás, por medio de la Ley 1715 de 2014.

En el artículo 1 de la Ley 1715 de 2014 se señala lo siguiente:

Objeto. La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda (Ley 1715 de 2014).

Se prevé la creación del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, orientado a financiar los programas de eficiencia energética.

Cabe resaltar que, a través de la Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos: Documento CONPES 3874 de 2016, se pretende articular el componente ambiental con el de servicio público. Para ello, desde el sector de los residuos sólidos, se requiere avanzar hacia una economía circular, en la que el valor de los productos y materiales se mantenga en el ciclo productivo durante el mayor tiempo posible. Mediante este enfoque, en los últimos años Colombia ha realizado esfuerzos en los sectores porcícola y avícola, dirigidos a impulsar acuerdos sectoriales con autoridades ambientales, a fin de resolver la gestión de vertimientos, aprovechando la energía generada en los biodigestores y el biofertilizante derivado del efluente líquido.

En este sentido, en Colombia, dentro de los mecanismos de desarrollo limpio, se han ejecutado proyectos integrales por medio de empresas especializadas en el aprovechamiento de recursos renovables (biomasa, desechos orgánicos, aguas residuales, etc.) para la producción de biogás y la generación de energía eléctrica y calorífica.

En conclusión, Colombia ha logrado avances significativos al incluir estrategias de economía circular en la gestión integral de residuos sólidos. En especial, intenta implementar la DA, dada la necesidad de poner en marcha sistemas de producción más limpia para cumplir con las leyes y los compromisos nacionales e internacionales adquiridos con la firma de diferentes tratados y acuerdos, que procuran alcanzar la sostenibilidad de los sistemas productivos.

Sin embargo, Colombia presenta, en general, un escaso desarrollo de las energías renovables (a excepción de la hidráulica). Ello, sumado al escaso interés y compromiso de los actores (tomadores de decisiones) y al mínimo desarrollo de nuevas tecnologías, en este caso, de la DA (etapas de diseño, seguridad y caracterización de efluentes), constituye un gran obstáculo para implementar procesos de uso, transformación y manejo de los residuos.

Por lo tanto, las políticas estatales deben incluir normas claras, específicas y actualizadas, articulación e incentivos para promover la implementación de tecnologías dirigidas a la producción de energías limpias. Además, deben fomentar la investigación para identificar soluciones apropiadas en el contexto del país, ya que la aplicación de tecnologías de países desarrollados de forma indiscriminada y sin el estudio de las condiciones y las adaptaciones necesarias ha generado problemas notables, como el bajo nivel de saneamiento y de tratamiento de las aguas residuales.

5.2.2 Referencias bibliográficas

Cendales, L; Darío, E. 2011. Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable (en línea). Tesis Mgtr. Bogotá, Colombia, UNAL. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7658>.

CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social, Colombia). 2016. CONPES 3874: política nacional para la gestión integral de residuos sólidos (en línea). Bogotá D. C. 73 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>.

Decreto n.º 2981, 2013 (en línea). Diario Oficial n.º 49 010. Colombia. 20 dic. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=56035>.

Departamento Nacional de Planeación, Colombia. 1994. Documento CONPES-2750-Minambiente-DNP-UPA: política nacional ambiental, salto social hacia el desarrollo humano sostenible (en línea). 57 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/2750.pdf>.

Ley 142 de 1994 (en línea). Diario Oficial n.º 41 433. Colombia. 11 jul. 1994. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.bogotajuridica.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2752>.

Ley 143 de 1994 (en línea). Diario Oficial n.º 41 434. Colombia. 12 jul. 1994. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.andi.com.co/Uploads/Ley_143_de_1994.pdf.

Ley 629 de 2000 (en línea). Diario Oficial n.º 44 272. Colombia. 27 dic. 2000. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dln_download&p=21745.

Ley 697 de 2001 (en línea). Diario Oficial n.º 44 573. Colombia. 5 oct. 2001. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>.

- Ley 788 de 2002 (en línea). Diario Oficial n.º 45 046. Colombia. 27 dic. 2002. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=7260>.
- Ley 1259 de 2008 (en línea). Diario Oficial n.º 47 208. Colombia. 19 dic. 2008. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=34388#:~:text=La%20finalidad%20de%20la%20presente,todas%20aquellas%20personas%20naturales%20>
- Ley 1665 de 2013 (en línea). Diario Oficial n.º 48 853. Colombia. 16 jul. 2013 Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.redjurista.com/Documents/ley_1665_de_2013_congreso_de_la_republica.aspx#.
- Ley 1715 de 2014. Art. 1 (en línea). Diario Oficial n.º 49 150. Colombia. 13 may. 2014 Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353#:~:text=Para%20efectos%20de%20interpretar%20y,para%20atender%20sus%20propias%20necesidades.>
- MINAMBIENTE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia). 2011. Informe del estado del medio ambiente y de los recursos naturales renovables 2010. Bogotá, Imprenta Nacional de Colombia.
- MME (Ministerio de Minas y Energía, Colombia). 2010. Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales – PROURE: Plan de Acción al 2015 con Visión al 2025 (en línea). Bogotá, Colombia. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/ENERGIA/URE/Informe_Final_Consultoria_Plan_de_accion_Proure.pdf.
- Pascalino, J; Acosta, P. 2012. Biogás: una alternativa energética a partir de los residuos orgánicos. Bogotá, Colombia, Agroverde. 3 ed.
- Torres, P. 2013. Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Revista EIA 9(18):115-129.

5.3 Revisión de los marcos regulatorio y normativo de Cuba sobre la DA

Autores: Luis Cepero Casas y José Antonio Guardado

En Cuba los primeros intentos de formulación de políticas para el desarrollo del biogás con acciones gubernamentales se realizaron a principios de los años ochenta. Se trataba de leyes dirigidas a la protección del medio ambiente y al uso racional de los recursos naturales, aprobadas en el artículo 27 de la Constitución de la República de Cuba (1992) en diciembre de 1980. Así surgió la Ley 33, compuesta por cuatro capítulos, 130 artículos y dos disposiciones finales, una de las cuales fue transitoria.

En varios artículos de dicha ley quedó de manifiesto que las entidades jurídicas y no jurídicas estaban obligadas a tratar sus residuos a través de la aplicación de los resultados de la ciencia. Además, se planteó la necesidad de estudiar los residuos de las producciones para su utilización como materias primas de otras actividades económicas, así como la de proteger el suelo, el agua y la atmósfera como elementos fundamentales de la vida.

En 1990 se aprobó el Decreto Ley n.º 118 (1990), en el que estableció la estructura, la organización y el funcionamiento del Sistema Nacional de Protección del Medio Ambiente, así como el uso racional de los recursos naturales y su órgano rector.

En junio de 1993 la Comisión Nacional de Energía desarrolló el Programa Nacional de Desarrollo de las Fuentes de Energía en Cuba, que fue aprobado por el Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros el 20 de mayo de 1993. Este programa, que contemplaba el desarrollo del biogás como una acción gubernamental, fue analizado por la Asamblea Nacional del Poder Popular durante el primer período ordinario de sesiones de la cuarta legislatura. Posteriormente, se convocó a la población y a las instituciones del país para participar en su materialización y perfeccionamiento progresivo.

En 1997 se creó la Ley 81 (1997), conocida como la Ley de Medio Ambiente, con el objeto de establecer los principios que rigen la política ambiental, las normas básicas para regular la gestión ambiental del Estado y las acciones de los ciudadanos y la sociedad en general, a fin de proteger el medio ambiente y contribuir a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible propuestos por el país.

Hasta 1997 todas estas leyes enmarcaban la necesidad de dar tratamiento a los diferentes residuos y disminuir el impacto ambiental de los contaminantes, incluidos los residuos orgánicos; no obstante, en la Ley 81 se consideraron instrumentos de la política y la gestión ambiental, entre ellos, la Estrategia Ambiental Nacional, el Programa Nacional de Medio Ambiente y Desarrollo y los demás programas, planes y proyectos de desarrollo económico y social. En esta ley por primera vez se recogieron aspectos específicos, como los incluidos en el capítulo séptimo, en el que se regulaban los límites de contaminación y protección de la atmósfera, en concordancia con los tratados y convenios internacionales, así como la política de los recursos energéticos endógenos, sobre todo de la biomasa y la aplicación de las fuentes renovables de energía (FRE). Asimismo, en su capítulo noveno se estableció la necesidad de lograr una agricultura sostenible, en la que los diferentes tratamientos de la biomasa, como los bioabonos para el mejoramiento de los suelos y la energía endógena (energía que se produce y consume en los mismos sistemas, o sea, en las comunidades rurales o fincas campesinas en el ámbito local) desempeñaban un papel importante debido a su aporte de nutrientes. En su artículo 95 se promovió la necesidad de aplicar tratamientos de biodigestión anaeróbica como tratamiento no solo de residuos, sino también de las aguas residuales de las actividades económicas y sociales, antes de ser vertidas al medio ambiente, a fin de evitar la contaminación de los embalses y las masas de agua terrestres y marítimas.

En el Decreto Ley 138 de las Aguas Terrestres (1993) se reforzó lo establecido en el capítulo 95 y se exigió el cumplimiento de la NC 27 (ONN 1999) para los efluentes líquidos. En los Decretos 179 (1993) y en la Resolución Conjunta 1-2008 (2008) se establecieron las regulaciones sobre los suelos y bioabonos, respectivamente.

En la Ley 81, en su artículo 126, se indicó que el Ministerio del Azúcar (hoy el Grupo Empresarial AZCUBA), el MINAG y el Ministerio de la Industria Básica, actualmente el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), una vez oído el parecer del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) y de los demás órganos y organismos competentes, establecerían

estrategias para el aprovechamiento de la biomasa y de otras alternativas tecnológicas para alcanzar un eficiente uso de las fuentes de energía y una disminución de la contaminación ambiental (Sosa *et al.* 2017). En 2011, durante el VI Congreso del Partido Comunista de Cuba (PCC), se aprobaron los lineamientos de la política económica y social del Partido, donde se plasma un conjunto de aspectos que contribuyen a la formulación e implementación de políticas y estrategias para la producción y utilización del biogás (PCC 2011).

En las políticas macroeconómicas del Gobierno cubano se incluyeron el otorgamiento de créditos, un régimen tributario diferenciado para las producciones agropecuarias y estímulos fiscales específicos. En este mismo capítulo, el acápite sobre política económica externa, asociado con la sustitución de importaciones y el papel de la industria cubana, de la inversión extranjera y la colaboración internacional, se destacó en el lineamiento 113 la prioridad de la colaboración internacional en términos de apoyo material y tecnológico para el aprovechamiento de las FRE.

En el capítulo V: "Política de ciencia, tecnología, innovación y medio ambiente", que se refiere al logro de resultados en el empleo de estas fuentes (incluido el biogás), la conservación del medio ambiente y el enfrentamiento al cambio climático, se precisaron también aspectos acerca de un marco regulatorio para propiciar la introducción de los resultados de la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI), la definición de una política tecnológica para contribuir a reorientar el desarrollo industrial y una mayor atención en la formación y capacitación. En el capítulo VI: "Política social", se enunció la necesidad de actualizar los programas de formación e investigación de las universidades, en función de las necesidades de desarrollo económico y social del país y de las nuevas tecnologías.

En diciembre de 2012, en el contexto de la descentralización de la producción porcina, que generó un incremento en la entrega de carne y la contaminación ambiental, la dirección del MINAG y la Asociación Nacional de Agricultores Pequeños (ANAP) emitieron una carta conjunta dirigida a los pequeños productores porcinos en torno a la necesidad de construir biodigestores para producir y utilizar el biogás. Posteriormente, el presidente de la República aprobó el Decreto Presidencial n.º 3 (2012), a partir del cual se constituyó una comisión gubernamental de alto nivel a fin de elaborar la propuesta de política para la utilización y el desarrollo prospectivo de las FRE durante el período 2013-2030. Además, se constituyó un grupo de trabajo, encargado del tema de la biomasa para preparar la propuesta de política hasta 2030.

Esta comisión elaboró la Propuesta de Política para el Desarrollo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía hasta 2030, aprobada en junio de 2014 por el Consejo de Ministros y la Asamblea Nacional del Poder Popular (ANPP). En esta política se estableció la meta de alcanzar una participación del 24 % de las FRE en la matriz eléctrica, incluido el aprovechamiento de la biomasa forestal, los desechos sólidos urbanos y los residuos orgánicos industriales y agrícolas, pudiendo aplicar siempre que resultase posible la biodigestión anaeróbica (MINEM 2015).

Teniendo en consideración la política ambiental cubana ya establecida y el Acuerdo de París (2015) para la mitigación de los efectos del cambio climático y la adaptación a este, además de los peligros reales que ya provoca este fenómeno en todo el mundo y, en particular, en los

pequeños países insulares como Cuba, en abril de 2017 el Consejo de Ministros aprobó el Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático (CITMA 2017), conocido como Tarea Vida.

Este plan consta de cinco acciones estratégicas y 11 tareas, de las cuales dos acciones y dos tareas guardan relación con el tema de la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos en términos de las actividades agropecuarias, el agua y la mejora de las condiciones de los suelos, en cuyo ámbito la introducción de la biodigestión anaeróbica (biodigestores) puede contribuir de forma significativa al tratamiento de residuos y la producción de bioabonos.

Asimismo, en los 23 principios rectores del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030 (PCC 2016) se incluyen los siguientes acápites relativos a la formulación e implementación de políticas y estrategias para el desarrollo del biogás en Cuba:

N.º 6. Propiciar y estimular la investigación científica, la aplicación de la CTI, así como su difusión y generalización en todos los ámbitos de la sociedad.

N.º 7. Transformar la matriz energética con una mayor participación de las FRE y de los demás recursos energéticos nacionales.

N.º 11. Garantizar el desarrollo preferente e integral de las ramas de la industria que contribuyen a la promoción de los sectores estratégicos.

N.º 12. Alcanzar niveles de producción y comercialización agropecuarias que garanticen un alto grado de autosuficiencia alimentaria.

N.º 16. Concebir la inversión extranjera directa como una parte esencial de la estrategia de desarrollo del país y, en particular, de los sectores estratégicos.

N.º 17. Ampliar y diversificar el comercio exterior y la cooperación internacional para incrementar su contribución al desarrollo nacional y local.

N.º 23. Asegurar la conservación y el uso racional de los recursos naturales, de modo que la protección del medio ambiente sea un factor que contribuya al desarrollo económico y social sostenible.

El documento de políticas más reciente, el Decreto-Ley n.º 345: Del Desarrollo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía (2017), tiene como finalidad establecer las regulaciones para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía. En los incisos 4 y 5 del artículo 2 se plantea la utilización de la biomasa no cañera, los recursos forestales, los desechos de la industria, los residuos agrícolas, pecuarios e industriales, y los desechos sólidos urbanos para producir biogás, **refiriéndose por primera vez de forma explícita a la producción de biogás**, a diferencia de los documentos anteriores, en los que se aludía al tratamiento de los residuos, pero con fines de disminución de la contaminación ambiental.

De conformidad con la sección V de este decreto ley se ofrecen incentivos y beneficios arancelarios y fiscales para la adquisición de equipos por parte de personas naturales y jurídicas a precios no recaudatorios y con créditos bancarios y se prioriza la inversión extranjera, que disfruta de exenciones totales o parciales de manera temporal o permanente, así como de otros beneficios que la ley le otorga, con una escala de incentivos gradualmente ascendente, en correspondencia con su aporte a la economía nacional. Además, las personas jurídicas que

importen componentes, partes, piezas, equipos y accesorios para un proceso inversionista o la fabricación de equipos, dispositivos o piezas asociadas a las FRE disfrutan de exenciones arancelarias, según el procedimiento establecido por el Ministerio de Finanzas y Precios, que puede estimularlos en términos tributarios, cuando se justifique económicamente.

En las disposiciones finales de dicho decreto ley se indica que: 1) El ministro de Energía y Minas dictará regulaciones para desarrollar el uso de FRE en los sectores residencial y no residencial; 2) el ministro de Comercio Interior establecerá el procedimiento para la comercialización y la fijación de los precios de venta de equipos que utilicen las FRE y hagan un uso eficiente de la energía; 3) el presidente del Banco Central de Cuba instruirá a los bancos que otorguen créditos para la adquisición de dichos equipos a las personas naturales y las personas jurídicas no estatales; 4) el Ministerio de Industrias presentará al MINEM un programa para el desarrollo y la producción de equipos, medios y repuestos para su uso en estos contextos; y 5) el Ministerio de Educación Superior (MES) y el CITMA, en coordinación con el MINEM, presentarán al Ministerio de Economía y Planificación (MEP) programas de investigación, desarrollo e innovación con el financiamiento necesario.

De acuerdo con el capítulo VI sobre política social, que responde a los lineamientos del VI Congreso del PCC, y teniendo en cuenta el Decreto-Ley n.º 345 (2017), en 2019 el MES y el MINEM crearon de manera conjunta el Grupo Nacional de Universidades para las Fuentes Renovables de Energía y la Eficiencia Energética, en apoyo a la implementación de la política relativa a las FRE y a la eficiencia energética (EE), la cual incluye el tema del biogás. Por otra parte, considerando el encargo del MEP de dar cumplimiento a la política de FRE, en 2021, mediante el Decreto-Ley n.º 345 se crearon y aprobaron las directrices para la elaboración de un programa de desarrollo, mantenimiento y sostenibilidad de las fuentes renovables y uso eficiente de la energía en los ámbitos provincial y de la Organización Superior de Dirección Empresarial, cuyo plazo es de cinco años y el cual incluye el tema del biogás. En este mismo año el MINEM aprobó la Orden Ministerial OM-395, que orienta a los gobernadores provinciales y a los intendentes de cada municipio en la elaboración de un programa de aprovechamiento de los desechos orgánicos provenientes de producciones agrícolas e industriales para producir biogás y biofertilizantes, el cual a corto plazo dará cumplimiento a la Ley 81 de Medio Ambiente y al Decreto-Ley n.º 345.

5.3.1 Conclusiones

Aún se carece de una política para la producción de biogás, a pesar de que se dispone de documentos que facilitan el desarrollo de programas y acciones para aumentar el número de plantas en el país y de que en la última década han surgido las semillas de dicha política:

1. La aprobación de los lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución (PCC 2011);
2. La aprobación del Decreto Presidencial n.º 3 de la Conceptualización del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista (2012);
3. La carta conjunta del ministro de Agricultura y el presidente de la ANAP, dirigida a productores que forman parte de convenios porcinos, con respecto a la necesidad de construir pequeños biodigestores y producir biogás (2012);

4. La Política para el Desarrollo de las FRE y el Uso Eficiente de la Energía hasta 2030, aprobada en junio de 2014 por el Consejo de Ministros y la ANPP (ANPP 2014);
5. La conceptualización del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista (PCC 2016);
6. El Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030 (PCC 2016);
7. El Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático, conocido como Tarea Vida, aprobado por el Consejo de Ministros (CITMA 2017);
8. La aprobación del Decreto-Ley n.º 345 (2017);
9. Las directivas para el desarrollo, el mantenimiento y la sostenibilidad de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía, emitidas por el ministro del MEP en febrero de 2021; y
10. La aprobación de la OM 395 del ministro del MINEM en abril de 2021.

Esta revisión de la legislación cubana vigente permite apreciar la existencia de un marco legal apropiado, que promueve y exige el tratamiento y el aprovechamiento de los residuos orgánicos biodegradables (sin generar impactos ambientales negativos) en la generación de abonos y la aplicación de las FRE y la EE en Cuba. Asimismo, deja ver que existen las condiciones para la formulación de una política sobre el biogás y el establecimiento de un marco regulatorio y normativo que posibilite la implementación eficaz en el país.

5.3.2 Referencias bibliográficas

- Acuerdo de París (en línea). 12 dic. 2015. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.
- ANPP (Asamblea Nacional del Poder Popular, Cuba). 2014. Desarrollo energético integral y sostenible. Cuba ANPP.
- CITMA (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Cuba). 2017. Tarea Vida: Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático. La Habana, Cuba. 8 p.
- Constitución de la República de Cuba (en línea). Art. 27. Cuba. 12 jul. 1992. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2001/0511.pdf>.
- Decreto n.º 179, 1993. Protección, uso y conservación de los suelos, y sus contravenciones. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba. 26 feb.
- Decreto-Ley n.º 118, 1990. Ley de Inversión Extranjera. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba. 18 ene.
- Decreto-Ley n.º 138, 1993. De las aguas terrestres. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba. 2 jul.
- Decreto-Ley n.º 345, 2017. Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba. 23 mar.
- Decreto Presidencial n.º 3, 2012. De la conceptualización del modelo económico y social cubano de desarrollo socialista. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba. 11 dic.
- Ley n.º 81 del Medio Ambiente. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba. 11 jul. 1997.

- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, Cuba). 2015. Implementación de la política para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía. La Habana, DER. 19 p.
- ONN (Oficina Nacional de Normalización, Cuba). 1999. NC 27:1999: vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. La Habana. 14 p.
- PCC (Partido Comunista de Cuba). 2011. Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución. La Habana. 41 p.
- PCC (Partido Comunista de Cuba). 2016. Conceptualización del modelo económico y social cubano de desarrollo socialista y el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030. Comité Central del PCC, La Habana, Cuba. 32 p.
- Resolución conjunta n.º 1, 2008. Certificación fitosanitaria de sustratos, materia orgánica, enmiendas, capa vegetal y otras, utilizadas como soporte de cultivos o mejoramiento de propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Gaceta Oficial de la República de Cuba. Cuba.
- Sosa, R; Díaz, Y; Cruz, MT; de la Fuente, JL; Domínguez, PL; Cabrera, I; Brunelys, R; Espinosa, N. 2017. Programa de implementación de biodigestores como sistemas de tratamiento de aguas residuales y la obtención de energía, biogás y fertilizante orgánico en la producción porcina cubana. Revista Computarizada de Producción Porcina 24(1):58-68.

5.4 Introducción y análisis situacional de Argentina

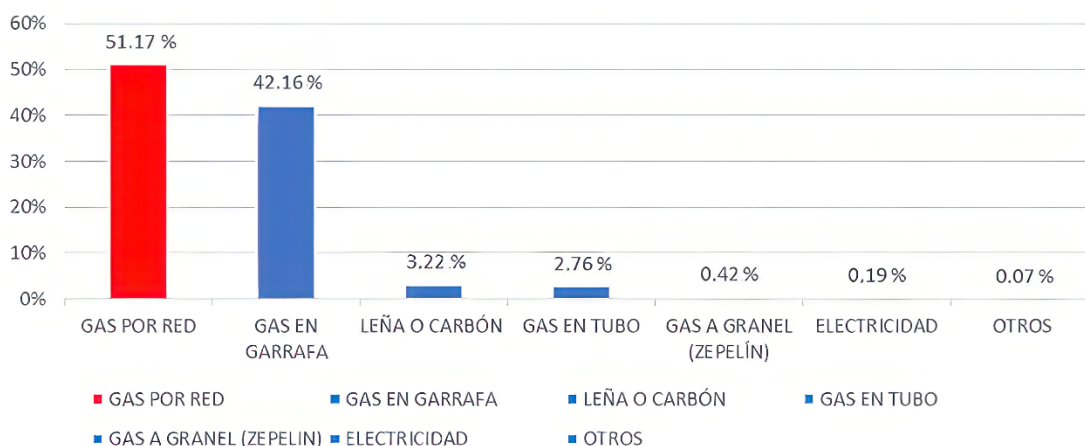
Autor: José Luis Betelu

En Argentina el 89 % de la matriz energética primaria corresponde a combustibles fósiles (55 % a gas natural de pozo y 34 % a petróleo) (Secretaría de Energía 2019). El 59.8 % de la energía se genera en centrales térmicas, abastecidas en un 95.5 % con gas natural y el 5 % restante, con gasóleo (2.25 %), fuelóleo (1 %) y carbón mineral (1.25 %) (CAMMESA 2019).

Según datos oficiales del INDEC (2010), solamente el 51.2 % de la población nacional tiene acceso a gas de red, mientras que el 45.34 % utiliza GLP envasado en garrafas (balones), tubos y zepelines (gas a granel). En el gráfico 13 se muestra dicha distribución.

Gráfico 13. Combustible utilizado principalmente para cocinar

Combustible usado principalmente para cocinar



Fuente: Elaborado con base en INDEC 2010.

El GLP envasado es utilizado principalmente por los pobladores rurales alejados de los gasoductos troncales, ya que carecen de los recursos para pagar una instalación interna o habitan en una vivienda precaria donde no se puede realizar la instalación por cuestiones de seguridad.

En términos de la distribución territorial, la Región Metropolitana de Buenos Aires concentra el 39 % del total de la población, mientras que el 71.3 % de las localidades poseen menos de 2000 habitantes y representan, en conjunto, el 3 % de la población total (MIOPyV 2018). En el siguiente gráfico se muestra la distribución territorial del país (ilustración 79).

Ilustración 79. Distribución territorial



Fuente: Tomado de MIOPyV 2018:66.

Las comunidades rurales dependen de una matriz energética compleja, que incluye electricidad proveniente de la red nacional, con numerosas caídas de tensión y cortes de suministro, así como gas envasado (garrafas, balones y tubos), lo que supone un alto costo para la economía de la familia rural, además de un elevado nivel de contaminación ambiental, si se considera su ciclo de vida.

Desafortunadamente, la escasa oferta laboral, la dificultad de acceso a la energía, los bajos ingresos asociados a las labores rurales y una baja calidad de vida en general promueven de manera constante el éxodo de la población rural más joven a centros urbanos que no siempre están preparados para recibir a esta población y cumplir sus expectativas en cuanto a trabajo, servicios y bienestar. Esta emigración afecta al pueblo rural debido a la ruptura de los vínculos sociales y culturales, la pérdida de infraestructura, la disminución de la explotación de los recursos naturales, culturales y humanos y el debilitamiento de la red social comunitaria. De forma simultánea, en los centros urbanos aumenta la marginalidad, la contaminación ambiental y la pérdida de la identidad cultural original.

Considerando la oferta y la demanda de energía descritas, resulta evidente que existe una oportunidad para el desarrollo y el crecimiento de las **energías renovables**, particularmente del biogás. Por medio de la implementación de redes aisladas de biogás o su purificación a biometano para su inyección en redes troncales de gas natural³⁹ lograríamos:

- Prestar un servicio esencial a las comunidades aisladas.
- Generar y distribuir gas en el punto de consumo.
- Reducir los costos logísticos.
- Reemplazar el gas envasado, lo que supone costos menores y más seguridad.
- Generar mano de obra local con arraigo.
- Disminuir la importación de combustibles.
- Reducir la contaminación ambiental y la huella de carbono.

Sin embargo, aún existen algunas barreras de orden institucional, legal, económico, técnico y sociocultural que deben superarse para incrementar, de acuerdo con su potencial, la proporción de bioenergía en la matriz energética nacional. A continuación, se profundiza en los aspectos mencionados.

5.4.1 Desarrollo del marco normativo nacional

5.4.1.1 Ley 26 093

En 2006 se sancionó la Ley Nacional de Biocombustibles 26 093: Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles, que en su artículo n.º 5 incluye como biocombustible al biogás producido a partir de **materias primas de origen agropecuario**, agroindustrias o desechos orgánicos. Esta ley, promulgada como instrumento de promoción de la producción de biocombustibles en todo el territorio nacional, está acompañada de una serie de decretos y resoluciones orientados a reglamentarla y a establecer mecanismos

³⁹ Cerca del 51 % de la población argentina está conectado a redes de gas natural. Este es uno de los porcentajes más altos de la región, donde el promedio es casi 27 % (BP Statistical review of World Energy 2017).

de competitividad, subsidios, procedimientos de mezcla, nuevos proyectos y prevención en plantas, entre otros. Con respecto a los mecanismos de promoción, el régimen nacional ofrece exenciones en materia de impuesto al valor agregado (IVA) y ganancias, asistencia para el desarrollo de tecnología, cuotas de distribución y respaldo de la actividad para que califique dentro de los mecanismos internacionales de reducción de emisiones, a fin de participar en los mercados de bonos de carbono y similares.

No obstante, en sus casi 15 años en vigencia, explícita o implícitamente, este marco normativo ha favorecido el uso de los biocombustibles líquidos (biodiésel y bioetanol) en detrimento del biogás, al no haberse generado aguas abajo un **marco normativo que permita su desarrollo**. Se han establecido cupos obligatorios de corte a los combustibles líquidos con biocombustibles⁴⁰, lo que conllevó el desarrollo de pymes y un mercado propio para empresas productoras de biodiésel y bioetanol, que excluyó a los combustibles gaseosos. Por tal motivo, los biocombustibles no se emplean en la generación de energía eléctrica, ya que el 95 % del combustible utilizado es gas natural y el 5 % restante está constituido por combustibles líquidos importados.

Asimismo, esta ley establece como autoridad de aplicación a la Secretaría de Energía, con lo cual, "Sólo podrán producir biocombustibles las plantas habilitadas a dichos efectos por la autoridad de aplicación" (Ley n.º 26 093 2006). He aquí un primer punto importante a discutir: la habilitación de las plantas de producción es de injerencia nacional. La Ley 26 093 nace a partir de la Ley Nacional de Hidrocarburos 17 319, en la que se considera a estos como un bien estratégico para el desarrollo nacional por requerir grandes inversiones para su explotación, transporte, proceso y distribución.

Sin embargo, los biocombustibles se generan a partir del manejo adecuado del agua y el suelo, recursos naturales que constitucionalmente fueron asignados a las provincias. La pregunta que surge es: si un biocombustible es producido, transportado y consumido íntegramente en territorio provincial, ¿por qué debería ser la autoridad de aplicación nacional la que habilite la planta de producción? En el caso de los biocombustibles que no serán mezclados con hidrocarburos ni incluidos en las redes de distribución troncales, la comercialización entre entidades privadas para su autoconsumo bajo una competencia estrictamente provincial favorecería la implementación de proyectos de desarrollo de la cadena de valor local, de baja escala y con una mayor industrialización.

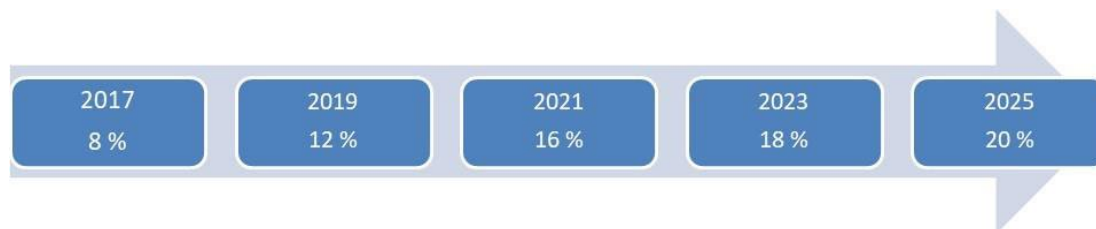
En 2021 esta ley dejó de estar en vigor, debido a lo cual ya se presentaron al Poder Ejecutivo diversos proyectos de ley para prolongar su vigencia, en los cuales se incluyen los lineamientos para incluir el biogás y el biometano como combustibles para la generación eléctrica y su uso vehicular y como porcentaje de corte para el gas natural.

⁴⁰ Actualmente el porcentaje de corte obligatorio (mínimos obligatorios de mezcla) del gasóleo con biodiésel es 10 %, mientras que el de las naftas con bioetanol es 12 %.

5.4.1.2 Ley 27 191

En materia de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, en la Ley 27 191 (2015) se establece el régimen de fomento nacional para el uso de FRE destinadas a la producción de energía eléctrica. En dicha ley se establece una serie de objetivos escalonados de proporción de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables dentro de la matriz energética nacional. En la ilustración 80 se muestran dichos objetivos.

Ilustración 80. Objetivos de generación de energía eléctrica renovable según la Ley 27 191



Amparados en dicha ley y mediante incentivos económicos, como una tarifa fija en dólares a 20 años y mecanismos de garantía financiera que involucran fideicomisos y entidades internacionales, en julio de 2016 se estableció el Programa de Abastecimiento de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables (RenovAr), a fin de materializar los objetivos planteados anteriormente. Hasta el momento se han llevado a cabo tres rondas del RenovAr (ronda 1, ronda 1.5 y ronda 2), con 147 proyectos adjudicados, que representan un total de 4466.5 MW de potencia. En materia de biogás son 37 los proyectos adjudicados en el ámbito nacional, por un total de 64.9 MW. Solo en la provincia de Buenos Aires se adjudicaron 7 proyectos, con una potencia total de 9.8 MW y un precio promedio de 161.8 USD/MWh.

Este programa dio un impulso necesario al desarrollo de las energías renovables en la República de Argentina; no obstante, promueve solo proyectos de gran escala (mayores a 500 kW) en la modalidad llave en mano con tecnologías importadas de países como Alemania o Italia y con un bajo porcentaje de componentes locales.

5.4.2 Mercado a término de energías renovables (MATER)

En el MATER, un mercado particular con una regulación específica, se realizan operaciones de compra y venta de energía renovable entre entidades privadas. Su objetivo es reglamentar un mecanismo de compra de energía eléctrica para efectuar dicha adquisición por libre acuerdo entre las partes, a fin de que los grandes usuarios del mercado eléctrico mayorista, cuyas demandas de potencia son iguales o mayores a 300 kW, tengan una alternativa para adecuarse a la Ley 27 191 por cuenta propia y no necesariamente como parte de la compra conjunta a la empresa mayorista (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A.), instrumentada en el RenovAr.

5.4.3 Ley de energía distribuida 27 424

La Ley 27 424 de Generación Distribuida es la que habilita a los consumidores de electricidad a convertirse en generadores a partir de FRE para el autoconsumo y la eventual inyección de electricidad en la red. Esta ley abre un mercado para el biogás, debido a que los productores agropecuarios y/o agroindustriales pueden generar su propia energía eléctrica para autoconsumo e inyectar un eventual excedente en la red, obteniendo una rentabilidad

económica adicional⁴¹. Además, brinda a los productores nuevas oportunidades de negocios y de adecuación a la legislación vigente en cuanto al tratamiento de efluentes.

5.4.4 Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER)

El PERMER brinda acceso a la energía derivada de fuentes renovables a la población rural del país que no tiene luz por estar alejada de las redes de distribución. Desarrolla diversas iniciativas para suministrar energía a hogares, escuelas rurales, comunidades aglomeradas y pequeños emprendimientos productivos. De esta manera, busca mejorar la calidad de vida de los habitantes rurales de la Argentina.

5.4.5 Conclusiones específicas sobre el biogás

En la jurisdicción nacional no existe una normativa específica que regule la producción de biogás ni su incorporación como fuente energética, lo que impide conocer los requisitos para habilitar este tipo de plantas y el camino que deben recorrer los proyectos sujetos a evaluación por parte de las autoridades. Sin esta reglamentación, los potenciales inversores no saben a qué atenerse.

La Ley 26 093 estableció un régimen de fomento a las energías renovables, que constituye un buen punto de partida, pero que hace hincapié en los biocombustibles líquidos. El sucesivo Decreto Reglamentario 109/2007 y la Resolución SE 1296/2008 establecen las condiciones mínimas de seguridad que deben cumplir las plantas de elaboración, almacenamiento y mezcla de biocombustibles líquidos (biodiésel y bioetanol), pero hasta el momento no contamos con una regulación específica para las plantas de biogás. En cuanto a los combustibles gaseosos fósiles como el GLP, la Secretaría de Energía establece por medio de la Resolución SE 8/2006 (2006) las "Normas mínimas para el diseño, construcción, operación y mantenimiento para plantas de GLP de bajo volumen para sistemas de distribución por redes" (Resolución 8 2006). De acuerdo con lo anterior, entendemos que el biogás debería seguir este mismo camino, a fin de que los potenciales inversores tengan un estándar mínimo por alcanzar, auditable para la autoridad de aplicación, a fin de obtener la habilitación de funcionamiento correspondiente.

Con respecto a las operaciones de transporte y distribución, que se hallan bajo la jurisdicción del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS)⁴², durante 2019 se avanzó en la elaboración y publicación de la Norma NAG-602 de 2019: Especificaciones de calidad para el transporte y la distribución de gas natural y otros gases análogos (NAG-602 2019)⁴³, que incorpora el biogás como combustible alternativo y establece las condiciones mínimas de calidad que este debe cumplir, no solo para su inyección en una red troncal como biometano, sino también para su distribución como biogás (sin mejorar [*upgrading* o eliminación del CO₂] a biometano) en redes aisladas. Aún es necesario establecer las normas específicas inherentes a la homologación de artefactos y equipos para su uso con biogás, así como las condiciones operativas y de seguridad que el biogás debe cumplir, desde su producción hasta su consumo.

⁴¹ Los *combined hot and power* son motores de cogeneración que, además de generar energía eléctrica, aprovechan el calor residual de los gases de escape como energía térmica para su utilización en los procesos industriales o de climatización.

⁴² Desde 1992, cuando se privatizó el mercado del gas en Argentina (hasta ese entonces hubo una única empresa distribuidora, denominada Gas del Estado), el ENARGAS es el organismo estatal que regula el transporte y la distribución del gas por red en Argentina.

⁴³ Normas Argentinas de Gas (NAG).

En relación con el digerido, a través de la resolución del SENASA⁴⁴ 19/2019 se reglamentó la aplicación agrícola del digerido proveniente de plantas de biodigestión anaeróbica para autoconsumo como biofertilizante, pero aún no se puede comercializar.

En materia ambiental cada provincia tiene una autoridad de aplicación y regulación (p. ej., en la Provincia de Buenos Aires es el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible), que debe establecer el alcance y la elaboración de guías ambientales para la certificación y habilitación de las plantas de producción de biogás. En este sentido, las externalidades⁴⁵ positivas generadas por el biogás son muy importantes; entre ellas se destacan el ahorro de emisiones de metano por la transformación de residuos en energía eléctrica y el de emisiones de CO₂ equivalentes por la cogeneración, así como la evitación de costos de tratamientos o de daños socioambientales generados por la contaminación de napas, ríos, arroyos y/o lagunas.

En términos económicos, aún debemos llevar a cabo una discusión más profunda sobre el verdadero costo de las diferentes formas de biogás para la producción de energía térmica y eléctrica, frente al costo real del gas natural utilizado para ese mismo fin. Establezcamos primero cual es el costo real de la energía en Argentina:

Ilustración 81. Costo de la energía sin impuestos (MMBTU)

Gasóleo para la generación eléctrica	•19,27 USD/MMBTU
Fuelóleo para la generación eléctrica	•18,64 USD/MMBTU
GLP comercial	•18 USD/MMBTU
Biogás natural licuado (bio-GNL) (100 % CE)	•17,7 USD/MMBTU
Bio-GNL (50 % CE)	•14,9 USD/MMBTU
GLP por red (sin subsidios)	•12,8 USD/MMBTU
Biometano (100 % CE)	•12,7 USD/MMBTU
Bio-GNL (0 % CE)	•12,2 USD/MMBTU
Biogás (100 % CE)	•10,7 USD/MMBTU
Fuelóleo	•10 USD/MMBTU
Gasóleo industrial	•10 USD/MMBTU
Biometano (50 % CE)	•9,9 USD/MMBTU
Subdistribuidora de GNC	•9,5 USD/MMBTU
Biogás (50 % CE)	•8 USD/MMBTU
GLP por red (subsidiado)	•7,65 USD/MMBTU
Biometano (0 % CE)	•7 USD/MMBTU
Fuelóleo industrial	•5,5 USD/MMBTU
Biogás (0 % CE)	•5 USD/MMBTU
Gas natural boca de pozo	•4 USD/MMBTU

Costo de transporte y distribución: 2 USD/MMBTU

COSTOS BIO

PRECIOS

1 MMBTU – 293 kWh

Como se puede observar, el biogás producido íntegramente a partir de efluentes agroindustriales es el combustible más económico. Se tomó como base de cálculo la operación

⁴⁴ El SENASA es el organismo oficial encargado de la fiscalización y la certificación de los productos y subproductos de origen animal y vegetal y de los residuos agroquímicos.

⁴⁵ Una externalidad es una situación en la que los costos o beneficios de la producción o el consumo de algún bien o servicio no se reflejan en su precio de mercado. En otras palabras, son externalidades aquellas actividades que afectan a otros sin que estos paguen o sean compensados por ellas.

correspondiente a una planta de 1 MWe⁴⁶ de potencia. El valor mostrado corresponde a un balance entre los gastos de capital y los gastos de operación. Para calcular el biometano se adiciona el costo de eliminación del CO₂, estimado en 2 USD/MMBTU.

El costo del gas natural por red se calculó de acuerdo con la tarifa de la distribuidora Camuzzi Gas Pampeana, aprobada por el ENARGAS en la subzona Buenos Aires, compuesta por: el precio del gas (valor del gas en boca de pozo, que remunera al productor), el costo del transporte (valor que se remunera al transportista) y el costo de distribución (el margen de distribución que remunera costos de explotación de la distribuidora más un margen máximo regulado). Se tomó como base de cálculo un usuario R34 (usuario residencial con un consumo mayor a 1800 m³/año a 9300 kcal/Nm³).

El precio del bio-GNL producido a partir de efluentes agroindustriales se determina agregando el precio de la eliminación del CO₂ del biogás, efectuada mediante una tecnología de criogenización, el cual es de aproximadamente 5 USD/MMBTU. Se toma como referencia la criogenización, ya que, **por limitaciones del marco regulatorio argentino actual, el biometano generado no se puede inyectar en la red nacional de gas** (a pesar de ser un combustible técnicamente idéntico al gas natural), debido a lo cual se requiere la licuefacción del excedente para su almacenamiento. Existen tecnologías de purificación más económicas (2 USD/MMBTU), en caso de que se pueda inyectar el total producido en la red.

En la actualidad el GLP tiene dos subsidios:

- El subsidio nacional a la compra de propano. Las distribuidoras y subdistribuidoras pagan únicamente el 70 % del valor real por tonelada de propano, mientras que el 30 % restante es subsidiado por el Estado. En octubre de 2016 se inició un proceso de normalización del precio por tonelada de propano, el cual quedó liberado a partir del 1.º de enero de 2020. Sin este subsidio, el precio pasa de 10 000 USD/t a 24 000 USD/t.
- El subsidio provincial (Ley n.º 13 126). Si la tarifa de GLP excede el valor de lo que paga un mismo tipo de usuario por el gas natural, el estado provincial subsidia la diferencia. Si agregamos el componente impositivo, el usuario de GLP paga un precio incluso menor que el mismo tipo de usuario de gas natural, ya que al precio del GLP se le aplica el 10.5 % de IVA, mientras que en el gas natural ese impuesto es del 21 %.

Los precios del GLP envasado se calcularon con base en costos reales de los usuarios industriales, mientras que los del gasóleo y del fuelóleo para la generación eléctrica se estimaron según los precios internacionales (de la Administración de Información Energética de los Estados Unidos).

El abastecimiento de biogás a localidades pequeñas por medio de redes aisladas fomenta el arraigo de la población, ya que propicia la prestación de servicios básicos esenciales que mejoran notablemente su calidad de vida (lo que supone beneficios económicos, de seguridad y de disponibilidad del recurso energético). Además, a través de redes para el consumo domiciliario, el biometano representa una oportunidad frente a la distribución de GLP.

⁴⁶ 1 MWe equivale a 1 MW de potencia eléctrica.

5.4.6 Referencias bibliográficas

- CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima, Argentina). Informe anual 2019 (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://cammesaweb.cammesa.com/download/informe-anual-2019/?wpdmdl=36401&refresh=63502c47a39661666198599>.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina). 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>.
- Ley n.º 26 093: Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Boletín Oficial de la República Argentina. Argentina. 15 may. 2006.
- Ley n.º 27 191: Modificaciones a la Ley 26 190: Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Boletín Oficial de la República Argentina. Argentina. 23 sep. 2015.
- MIOPyV (Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda, Argentina). 2018. Plan Estratégico Territorial Argentina: avance 2018 (en línea). Ciudad de Buenos Aires. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/plan_estrategico_territorial_2018_baja.pdf.
- Norma NAG-602, 2019. Especificaciones de calidad para el transporte y la distribución de gas natural y otros gases análogos. Argentina.
- Secretaría de Energía. 2019. Balance energético nacional, año 2019 (en línea). Buenos Aires, Argentina. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>.
- Subsecretaría de Energías Renovables. 2016. RenovAr: Programa de Abastecimiento de Energía Eléctrica a partir de Fuentes Renovables (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/renovar>.
- Resolución E 281, 2017. Régimen del mercado a término de energía eléctrica de fuente renovable – aprobación. Boletín Oficial de la República Argentina. Argentina. 18 ago. 2017.
- Resolución E 268, 2017. Delegación de facultades. Boletín Oficial de la República Argentina. Argentina. 9 ago. 2017.
- Resolución 8, 2006. Gas licuado. Boletín Oficial de la República Argentina. Argentina. 13 ene. 2006.

5.5 Estado actual y áreas de oportunidad en materia de políticas nacionales para la implementación de la DA en Paraguay

Autor: Federico Vargas

5.5.1 Introducción

El Paraguay, a pesar de que genera casi toda su energía en plantas hidroeléctricas, sigue dependiendo significativamente de la energía derivada de la biomasa, sobre todo de la leña y el carbón, para la cocción de alimentos y la puesta en marcha de calderas industriales.

Actualmente cuenta con diversas iniciativas legales como la política energética y el código ambiental, mediante las cuales se busca diversificar las fuentes de generación de energía, entre ellas algunas relacionadas con el biogás y los biodigestores. A pesar de ello, hoy el país carece de un programa o proyecto de envergadura, dirigido a promover y fortalecer el uso de biodigestores.

5.5.2 Políticas públicas y marco normativo en Paraguay

En la actualidad el código ambiental se encuentra en estudio en el Poder Legislativo. Tiene como fin establecer los lineamientos y principios ambientales para orientar las políticas públicas en el país, de ahí su importancia en la promoción de los biodigestores como una estrategia para mitigar el impacto ambiental de las actividades humanas, ya que indica que el Estado debe fomentar en los sectores público y privado el desarrollo y uso de tecnologías limpias y de energías alternativas y de bajo impacto (Proyecto de Ley Código Ambiental 2020).

En uno de sus ejes principales, el de los residuos sólidos, se podría considerar el empleo de biodigestores para su tratamiento; sin embargo, no se menciona ningún tipo de tecnología y solo se establecen lineamientos generales como los principios de corresponsabilidad, de congruencia, de prevención, de sustentabilidad y de valor de mercado (Proyecto de Ley Código Ambiental 2020).

Si bien el Código Ambiental abre algunas posibilidades para la promoción de los biodigestores, en ningún apartado se menciona esta tecnología; lo mismo ocurre con la Ley n.º 3956/09: Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay, en la que si bien se habla del aprovechamiento de los residuos (capítulo VII) y de su disposición final (capítulo IX), en ningún caso se sugiere el empleo de biodigestores como una opción (Ley n.º 3956 2009).

En el decreto reglamentario de la Ley n.º 3956 ya se puede encontrar la definición legal de biogás: "Conjunto de gases generados por la descomposición microbiológica de la materia orgánica" (Decreto n.º 7391 2017) y se considera la posibilidad de utilizar los residuos sólidos como fuente energética. Además, en el capítulo VII: "De la planta de selección y tratamiento de residuos sólidos" se considera a las plantas de biogás como plantas de tratamiento intermedias, pero no se establece ningún tipo de reglamentación al respecto (Decreto n.º 7391 2017).

Asimismo, el Paraguay cuenta con la Política Energética, promulgada en 2016 por medio del decreto presidencial n.º 6092/2016, la cual contiene 5 objetivos superiores y 18 objetivos específicos (Decreto n.º 6092 2016). De ellos, los que guardan relación con los biodigestores o que promueven su uso se presentan en la tabla 26 y 27.

Tabla 26. *Objetivos superiores y específicos que impulsan el uso de biodigestores en Paraguay*

<p>Objetivos superiores:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Garantizar la seguridad energética a través de criterios de autoabastecimiento, eficiencia, mínimo costo y responsabilidad socioambiental, en respaldo al desarrollo productivo del país. 2. Asegurar el acceso a energía de calidad a toda la población, atendiendo los derechos del consumidor. 3. Utilizar las fuentes nacionales de hidroelectricidad y bioenergía, así como otras fuentes alternativas e incentivar la producción de hidrocarburos, como recursos estratégicos para reducir la dependencia externa e incrementar la generación de un mayor valor agregado en el plano nacional. 4. Propiciar en la población la comprensión de la importancia de la energía y su uso sostenible como factor de desarrollo integral.
<p>Objetivos específicos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Fortalecer la capacitación técnica de los recursos humanos y la educación de toda la población en materia de energía. 2. Fomentar la investigación científica y tecnológica vinculada al desarrollo sostenible e integral de la energía. 3. Definir de manera precisa los roles institucionales de los actores del sector. 4. Sistematizar la gestión de los datos, la información, la documentación y la planificación del sector. 5. Garantizar la gestión transparente de los actores con una comunicación eficaz. 6. Impulsar la producción nacional de insumos para el sector energético. 7. Asegurar el financiamiento público y privado de las inversiones en mantenimiento, modernización, expansión de infraestructura y desarrollo tecnológico. 8. Mejorar los niveles de eficiencia energética en la oferta y demanda de energía. 9. Promover el uso de fuentes de energía, incluidas las alternativas, con la participación de los gobiernos subnacionales y otros actores. 10. Fomentar en los proyectos energéticos la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático y la implementación de servicios ambientales. 11. Consolidar la coordinación institucional con atribuciones y recursos para la formulación de políticas, la planificación, la regulación y la fiscalización.

Fuente: Elaborado con base en Decreto n.º 6092 2016.

Esta política se estructuró con base en cuatro subsectores, de los cuales, el relativo a los biodigestores se denomina “bioenergía y fuentes alternativas de energía”. Los objetivos superiores de este subsector son: contribuir a la seguridad energética, el desarrollo y la diversificación de fuentes nacionales de energía; fomentar el uso de bioenergías y otras fuentes alternativas de manera sostenible con criterios de eficiencia, competitividad y calidad; e impulsar la generación de empleo y valor económico vinculados al subsector. Además, cuenta con los 18 objetivos específicos que se presentan en la tabla 28 (Decreto n.º 6092 2016).

Tabla 27. *Objetivos específicos del subsector de la bioenergía y fuentes alternativas de energía*

1. Consolidar el marco legal, regulatorio y ambiental para el desarrollo del subsector.
2. Propiciar la generación de ingresos con base en mecanismos de mercado que impulsen el desarrollo del subsector.
3. Garantizar instrumentos financieros para el desarrollo de la bioenergía y otras energías alternativas.
4. Definir los roles institucionales de los órganos de política, planificación, regulación y fiscalización.
5. Fortalecer a los actores relevantes, de acuerdo con sus respectivos roles.
6. Consolidar una coordinación institucional con atribuciones legales y recursos para el ejercicio de sus funciones.
7. Fomentar el aprovechamiento de la bioenergía, las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y otras fuentes alternativas en la producción de electricidad.
8. Promover el uso de fuentes de bioenergía y otras fuentes alternativas con criterios de sostenibilidad.
9. Gestionar de manera sostenible los cultivos con fines energéticos.
10. Sistematizar la gestión de datos, información y documentación del subsector.
11. Incentivar la producción nacional de insumos, servicios y equipos para el aprovechamiento de fuentes alternativas de energía.
12. Fortalecer las capacidades de planificación de los actores públicos.
13. Fomentar las actividades de formación de recursos humanos, investigación y desarrollo tecnológico vinculado al subsector.
14. Propiciar la sinergia entre actores y grupos de interés.
15. Gestionar de forma transparente y participativa a los grupos interesados mediante una comunicación eficaz.
16. Promover la transferencia de conceptos sobre el aprovechamiento de las fuentes alternativas de energía en los diferentes niveles educativos.

Fuente: Elaborado con base en Decreto n.º 6092 2016.

Aunque estos 18 objetivos específicos podrían ser utilizados para impulsar el uso de biodigestores en Paraguay, en la práctica muy pocas instituciones gubernamentales o privadas se abocan a la promoción de esta tecnología. La alternativa energética más impulsada en Paraguay se asocia con la biomasa forestal.

Esta política energética abarca diferentes planes de acción, de acuerdo con los objetivos específicos del sector energético nacional y sus subsectores. Para organizar estos planes se plantean los ejes estratégicos de gestión y seguridad, eficiencia y sustentabilidad y transversales (Decreto n.º 6092 2016).

Estos planes de acción cuentan con diferentes líneas estratégicas. En el subsector de la bioenergía y fuentes alternativas de energía se han formulado planes de acción institucional, financiera, de matriz energética, de eficiencia energética, de sociedad y ambiente, de recursos humanos, investigación, desarrollo y educación (I+D+E), información y planificación energética

(Decreto n.º 6092 2016), los cuales cuentan con líneas estratégicas, instrumentos, metas y plazos. En la tabla 28 se realiza una selección de las líneas estratégicas, los instrumentos, las metas y los plazos vinculados directamente a los biodigestores o que podrían utilizarse para impulsar el uso de esta tecnología en el Paraguay.

Tabla 28. Planes de acción y su vinculación con objetivos estratégicos, líneas estratégicas, instrumentos, metas y plazos

Plan de Acción	Objetivo específico	Líneas estratégicas	Instrumentos	Metas y plazos
Institucional	Consolidar el marco legal, regulatorio y ambiental para el desarrollo del subsector.	Establecimiento y funcionamiento de la producción y el transporte independientes de electricidad	Ley de generación independiente de energía	Ley de generación independiente promulgada
			Reglamento de generación distribuida	Reglamento de generación distribuida de la Administración Nacional de Energía (ANDE) en aplicación
			Reglamento de las transacciones de energía con productores independientes	Reglamento de las transacciones de la ANDE en aplicación
De Financiamiento	Garantizar instrumentos financieros para el desarrollo de la bioenergía y otras fuentes alternativas.	Incentivo del desarrollo de las energías renovables	Fondo nacional para el desarrollo de la energía renovable	Proyectos de energías renovables beneficiados a corto plazo: 2, a mediano plazo: 5, y a largo plazo: 7
De Matriz Energética	Promover el uso de fuentes de bioenergía, energía solar y eólica y otras alternativas con criterios de sostenibilidad.	Promoción de fuentes alternativas de energía	Programa de promoción del biogás y usos térmicos de la energía solar	Proyectos piloto de generación y uso del biogás en centros de formación para la producción animal en cooperativas
	Fomentar el aprovechamiento de la bioenergía, las	Diversificación de la oferta de energía eléctrica	Programa de promoción de fuentes renovables para	Plan piloto de generación eléctrica a partir de biogás

	PCH y otras fuentes alternativas en la producción de electricidad.		la generación eléctrica	producido con aprovechamiento de residuos sólidos urbanos
Sociedad y Ambiente	Gestionar de forma transparente y participativa los grupos de interesados con una comunicación eficaz	Sinergia entre los actores del subsector de bioenergías y otras fuentes alternativas	Programa de actividades nacionales e internacionales para el desarrollo de las bioenergías y las fuentes alternativas de energía	Dos actividades internacionales y cuatro nacionales realizadas en el corto plazo; tres actividades internacionales y diez nacionales, en el mediano plazo; y seis internacionales y quince nacionales, en el largo plazo
De Recursos Humanos y I+D+E	Promover la transferencia de conceptos de aprovechamiento de las fuentes alternativas de energía en los diversos niveles educativos.	Educación y concienciación acerca del subsector de la bioenergía y otras fuentes alternativas	Programa de educación básica y media con tópicos de bioenergía y otras fuentes alternativas de energía	Programa de educación básica y media con tópicos de bioenergía y otras fuentes alternativas de energía ejecutado
	Fomentar actividades de formación de recursos humanos, investigación y desarrollo tecnológico vinculados al subsector.	Formación y capacitación técnica de recursos humanos en el subsector de la bioenergía y fuentes alternativas	Programas de educación media técnica y de tecnicatura profesional en bioenergía y fuentes alternativas de energía	Programas de educación media técnica y de tecnicatura profesional en bioenergía y otras fuentes alternativas de energía ejecutado
			Programa de posgrado en bioenergía y fuentes alternativas	Programa de posgrado en bioenergía y fuentes alternativas ejecutado
			Promoción de la I+D en el subsector de la	Programa de investigación para el

		bioenergía y otras fuentes alternativas	desarrollo de la bioenergía y otras fuentes alternativas de energía	bioenergía y otras fuentes alternativas de energía ejecutado
De Información y Planificación Energética	Propiciar la producción nacional de insumos, servicios y tecnología para el aprovechamiento de la bioenergía y otras fuentes alternativas.	Incremento de la participación nacional en la producción de bienes y servicios en el sector energético	Estrategia de competitividad para proveedores de bienes y servicios del sector energético	Estrategia definida y aplicada

Fuente: Elaborado con base en Decreto n.º 6092 2016.

Como se puede apreciar en la tabla 28, en la política energética nacional solo se han identificado dos instrumentos que mencionan de manera específica los biodigestores, que son los relativos a la promoción del uso del biogás y a la generación eléctrica con plantas de biogás a partir del aprovechamiento de los RSU.

En cuanto al uso de los biodigestores en el tratamiento de residuos agrícolas y forestales, la experiencia en el país también es incipiente y se limita más a acciones desarrolladas por las universidades y ONG. Los principales objetivos de estas acciones están relacionados con la disminución del impacto ambiental de la agricultura familiar y el mejoramiento de la disponibilidad energética para la cocción de alimentos.

5.5.3 Referencias bibliográficas

Decreto n.º 6092, 2016. Política Energética de la República del Paraguay. Paraguay. 10 oct.

Decreto n.º 7391, 2017. Por el cual se reglamenta la Ley n.º 3956/2009 Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay. Paraguay. 28 jun.

Ley n.º 3956 Gestión Integral de los Residuos Sólidos en la República del Paraguay. 24 dic. 2009.

Proyecto de Ley Código Ambiental (en línea). Paraguay. 2020. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2020/11/Proyecto-de-Ley-del-Codigo-Ambiental.pdf>.

5.6 Marco normativo de residuos de Brasil

Autor: Adriano Henrique Ferrarez

En materia de clasificación de residuos, en Brasil se destacan las normas de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) y las instrucciones normativas (IN), entre ellas, la ABNT NBR 10 004/2004 y la IN del Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables (IBAMA) n.º 13 del 18 de diciembre de 2012.

En el artículo 1 de dicha IN se menciona la publicación del *Listado brasileño de residuos sólidos*, que debe ser utilizado por el Registro Técnico Federal de Actividades Potencialmente Contaminantes o Usuarías de Recursos Ambientales, el Registro Técnico Federal de Actividades e Instrumentos de Defensa Ambiental, el Registro Nacional de Operadores de Residuos Peligrosos, así como los futuros sistemas informáticos del IBAMA que podrán tratar los residuos sólidos. La IN n.º 13/2012 adopta los códigos de la ABNT NBR 10 004/2004 y presenta bajo el código 02 a los residuos provenientes de la agricultura, la horticultura, la acuicultura, la silvicultura, la caza y la pesca, así como de la preparación y el procesamiento de productos alimenticios: 02 01 a los residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; 02 03 a los residuos de la preparación y procesamiento de frutas, hortalizas, cereales, aceites comestibles, cacao, café, té y tabaco; y 02 07 a los residuos de la producción de bebidas alcohólicas y no alcohólicas (excepto del café, el té y el cacao).

Recientemente, el Ministerio de Desarrollo Regional dirigió esfuerzos a cumplir los objetivos de la Política Nacional de Desarrollo Regional (PNDR) (Resolución n.º 80 2018), cuya finalidad es reducir las desigualdades económicas y sociales intra e interregionales, por medio de la creación de oportunidades de desarrollo que redunden en crecimiento económico, generación de ingresos y mejoramiento de la calidad de vida de la población.

Para ello, estableció como estrategia de desarrollo regional e inclusión productiva las *Rutas nacionales de integración*, contempladas en el Plan Plurianual del Gobierno Federal bajo el objetivo 0840, que busca promover la estructuración de las actividades productivas, los arreglos productivos y las vías de integración para el desarrollo regional y territorial. Uno de los criterios establecidos para definir y seleccionar las cadenas productivas a las que dichas rutas les brindaría apoyo es su potencial de inclusión productiva, sostenibilidad ambiental, crecimiento sectorial y desarrollo tecnológico, especificando que el sector debe brindar una oportunidad para crear nuevos productos y negocios a partir de innovaciones en actividades de producción y procesamiento o en servicios asociados.

Como complemento de la RenovaBio, establecida a través de la Ley n.º 13 576/2017, se destaca el papel estratégico que los biocombustibles desempeñan en la matriz energética nacional (MMA 2020) a partir del biogás en la generación de electricidad y la ampliación de la autonomía energética.

Las normas Aneel n.º 414/2010, n.º 482/2012 y n.º 687/2015 (Agencia Nacional de Energía Eléctrica 2010; Agencia Nacional de Energía, 2012 y Agencia Nacional de Energía, 2015) posibilitan el acceso a la microgeneración y minigeneración distribuida a los sistemas de distribución de energía eléctrica y al sistema de compensación de energía. También cabe destacar la Resolución n.º 08/2015 de la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, que reglamentó el uso del biometano (biogás purificado) para su incorporación en la red de gas natural y para su uso como combustible de vehículos.

En lo que respecta a los residuos líquidos, el Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) determina, en la Resolución CONAMA n.º 430 del 11 de marzo de 2011, las condiciones y normas para la descarga de efluentes, complementando y modificando su Resolución n.º 357 del 17 de marzo de 2005. El efluente proveniente de cualquier fuente contaminante deberá ser

tratado de manera adecuada y cumplir con las condiciones y normas ambientales previstas en esta resolución para que pueda ser vertido en las masas de agua, de modo que su disposición no altere la calidad del agua y no tenga efectos nocivos en los organismos acuáticos. Cuando se dispone en el suelo, incluso si se somete a tratamiento, el efluente no podrá generar polución ni contaminación de las aguas.

Entonces, se destaca la correspondencia entre el marco legal brasileño y el incentivo y la legalización del aprovechamiento de los residuos en la producción de energía, como en el caso del biogás. Para ello se deben promover oportunidades para el desarrollo y la obtención de nuevos productos, considerando la sostenibilidad ambiental y el logro de la seguridad energética en las zonas rurales.

5.6.1 Referencias bibliográficas

Agencia Nacional de Energía Eléctrica. 2010. Aneel n.º 414/2010. (en línea). Brasil, Legislación web. Consultado 22 de diciembre de 2022. Disponible en <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=112868>

Agencia Nacional de Energía. 2012. Aneel n.º 482/2012. (en línea) Brasil, Legislación web. Consultado 22 de diciembre de 2022. Disponible en <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=342518>

Agencia Nacional de Energía. 2015. Aneel n.º 687/2015. (en línea). Brasil, Coordenação de Organização da Informação Legislativa – CELEG.

MMA (Ministerio de Medio Ambiente, Brasil). 2020. Plan Nacional de Residuos Sólidos (en línea). Brasilia. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://smastr16.blob.core.windows.net/conesan/sites/253/2020/11/pnrs_2020.pdf.

Resolución n.º 80, 2018 (en línea). Diário Oficial da União. Brasil. 28 feb. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/4913585/do1-2018-03-01-portaria-n-80-de-28-de-fevereiro-de-2018-4913581.

6

CAPÍTULO

CAPÍTULO 6

CASOS DE REDES, ASOCIACIONES Y ORGANIZACIONES QUE TRABAJAN CON LA DA DE RESIDUOS⁴⁷

Desde 2015 y hasta la fecha la Red de Biodigestores del Ecuador (RedBioEc) ha ido creciendo, al igual que el interés en los talleres, seminarios y encuentros que esta organiza. En este sentido, **la unión y el involucramiento de organizaciones de la agroecología han sido muy importantes**, ya que este constituye el principal sector interesado en implementar la tecnología de biodigestión para promover la sostenibilidad de las granjas productivas. Se debe hacer hincapié en aprovechar el potencial de los biodigestores como herramienta para el saneamiento ambiental y en promover el uso efectivo del biogás como fuente energética más allá de la combustión, expandiendo un horizonte de posibilidades para su utilización a escala doméstica, productiva e industrial.

Con respecto a la implementación de una política orientada al sector, algunos opinan que esta es **prioritaria, porque se incrementarían las exigencias ambientales** y, por ende, se tendería a instalar un mayor número de estos sistemas, lo que se acoplaría a la agenda nacional para cumplir los ODS y lograr la disminución de la huella de carbono. La idea es que dicha política se sume a un mayor control y seguimiento de los sistemas ya instalados, pero que no frene las posibilidades, las herramientas ni los medios disponibles en la actualidad para expandir esta tecnología en el país.

La RedBioEc sigue creciendo para generar capacidades mediante encuentros presenciales dirigidos a mostrar esta tecnología y su funcionalidad. La planificación estratégica de estas políticas es vital para evitar que su desarrollo sea contraproducente. En entrevistas con algunos actores se discute qué tan prudente es hacerlo ahora o cuál sería la hoja de ruta para su desarrollo, puesto que, por una parte, no se tiene claro qué organismo estatal se encargaría de su gestión y ejecución, mientras que, por otro lado, se piensa que ello llevaría a un mayor trámite burocrático para la implementación de los biodigestores, lo que podría llegar a poner en riesgo la inercia actual.

Según la opinión de los actores entrevistados, se debe mejorar la infraestructura de los biodigestores y probar con nuevos materiales y sustratos para potenciar la producción del biogás. En Ecuador ese tipo de investigaciones ya se está ejecutando y los involucrados principales son universidades y centros de investigación como el Instituto para el Desarrollo de Energías y Materiales Alternativos de la Universidad San Francisco de Quito, la Universidad Técnica de Ambato y el Centro de Investigación de la Universidad Estatal de Bolívar.

⁴⁷ Autores: Luis Cepero Casas, José A. Guardado y Lisbeth Molina.

También se les ha consultado sobre la existencia y posible implementación de **sistemas integrados de biodigestión para la distribución de biogás como fuente de combustible para poblados urbanos o rurales centralizados**. En este sentido, lo que sorprende es que se muestra mucho interés en esta propuesta, pero en el país aún se carece de la infraestructura y la capacidad para implementar sistemas a esta escala; no obstante, se han considerado algunas experiencias de otros países que podrían aumentar el interés mostrado.

En Cuba, en 1984 el MUB, junto con albañiles, especialistas, aprendices, usuarios y técnicos, inició su trabajo con materiales locales. Este movimiento, que surgió como un grupo dedicado a la gestión de residuos, se transformó ante la crisis energética y hoy constituye un representativo espacio de intercambio solidario y voluntario, en el que cada participante asume los gastos para nutrirse de diferentes experiencias e intercambios, contribuyendo de forma directa al desarrollo de soluciones no solo ambientales, sino también energéticas y productivas.

Con respecto al seguimiento a los digestores, esta entidad ha identificado la necesidad de solicitar apoyo al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP) de Ecuador y a otras organizaciones. Se requiere su integración en nuevos espacios y redes como la red universitaria, aprovechando los resultados de la ciencia y la técnica para la aplicación de esta tecnología en el sector productivo.

Con frecuencia las redes más exitosas se fundamentan en la voluntad e intereses comunes, por lo que no deben basarse en mecanismos de financiamiento. Su fin es obtener beneficios en materia de conocimiento y aprendizaje.

En Costa Rica la AsoBiogás, fundada en 2014 y conformada por académicos e investigadores, tiene como objetivo ceñirse al trabajo en torno a la DA. Trabaja en grupos de trabajo en diferentes temas en las escalas doméstica e industrial para atender distintas necesidades y lograr impactos positivos. Los productores de biogás pueden ingresar en ella sin incurrir en ningún costo de membresía. Los fundadores, quienes recibieron el apoyo de la GIZ, decidieron obtener una cédula jurídica, lo que les ha permitido desarrollar proyectos (Energía para Todos) y convenios, contratar consultores y, finalmente, funcionar como una pequeña empresa. A medida que crezca, esta asociación deberá vincularse a organizaciones de interés público (a fin de recibir donaciones más significativas, por ejemplo) y lograr una mayor incidencia en materia de políticas públicas.

6.1 El MUB en Cuba

***Autores:** Luis Cepero Casas, José Antonio Guardado, Luis Bériz Pérez, coordinadores regionales, provinciales y municipales, usuarios y activistas del MUB*

Debido a su injerencia en medio de la crisis económica, energética y medioambiental que enfrenta el mundo de hoy, la tecnología del biogás, considerada como una tecnología de avanzada, requiere un desarrollo acelerado.

En Cuba, aun cuando la ciencia, la técnica y el ingenio popular se habían ido fortaleciendo por medio de la formación de recursos humanos en la aplicación de esta tecnología en los sectores más desfavorecidos a pequeña y mediana escala, no se había logrado su consolidación ni generalización hasta que surgió el MUB. A través del desarrollo anual de talleres y encuentros

nacionales de usuarios del biogás, el MUB llega a todas las regiones del país. Se trata de una red voluntaria y solidaria, vinculada a la tecnología del biogás para su promoción, desarrollo y aplicación desde una cultura socioambiental sostenible (ilustración 82).

Ilustración 82. Las diferentes etapas del MUB y la prevista para su segundo período (MUBFRE)



Diferentes etapas del MUB y la prevista para el MUBFRE en el siglo XXI

El MUB, como agente de desarrollo que confiere al biogás un carácter de sostenibilidad integral en pos de lograr efectos positivos (directos e indirectos) en la economía local, tiene en cuenta que:

1. Las aguas residuales constituyen un problema sanitario, pero, al mismo tiempo, son un recurso muy apreciado en la agricultura y la piscicultura, debido a su gran valor económico, siempre que su tratamiento y manejo sean los adecuados.
2. Todo uso técnico del agua debe basarse en el concepto de ciclo cerrado. Las poblaciones están intercaladas en el ciclo continuo del agua mediante su abastecimiento y la evacuación de sus aguas residuales. No se puede resolver el problema del abastecimiento de agua sin pensar en el de las aguas residuales.
3. Es erróneo pensar que se puede obtener agua limpia e intacta de un sitio donde esta nunca ha estado en contacto con el hombre, así como es equivocado creer que se puede verter agua residual en un lugar donde esta jamás volverá a tener contacto con él.

En un primer período, el MUB unió a la gran mayoría de usuarios de la tecnología del biogás de todo el país con el objetivo de intercambiar conocimientos, desarrollar capacidades de construcción de biodigestores, generalizar las mejores prácticas e incluso de difundir las experiencias exitosas en las diferentes latitudes del país, aprovechando los recursos locales de cada región (Guardado 2016, Guardado y Fernández 2016).

El MUB, cuya membrecía abarca a más de 5000 personas de todos los estatus de la sociedad cubana, ha trabajado con diferentes actores en el ámbito local en las 15 provincias del país, siguiendo la estructura que se presenta en la ilustración 85.

Además, ha trabajado con diversas instituciones y organizaciones, entre las que cabe destacar la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y los foros de ciencia y técnica. El MUB ha funcionado con el apoyo de los gobiernos municipales y provinciales, así como con recursos propios y la autogestión de sus integrantes, lo que incluye financiamientos por acciones de colaboración dentro y fuera de Cuba.

Su escenario fundamental ha sido las fincas productoras y de autoconsumo, las entidades porcinas y otros usuarios en general, como parte de las estrategias de desarrollo local.

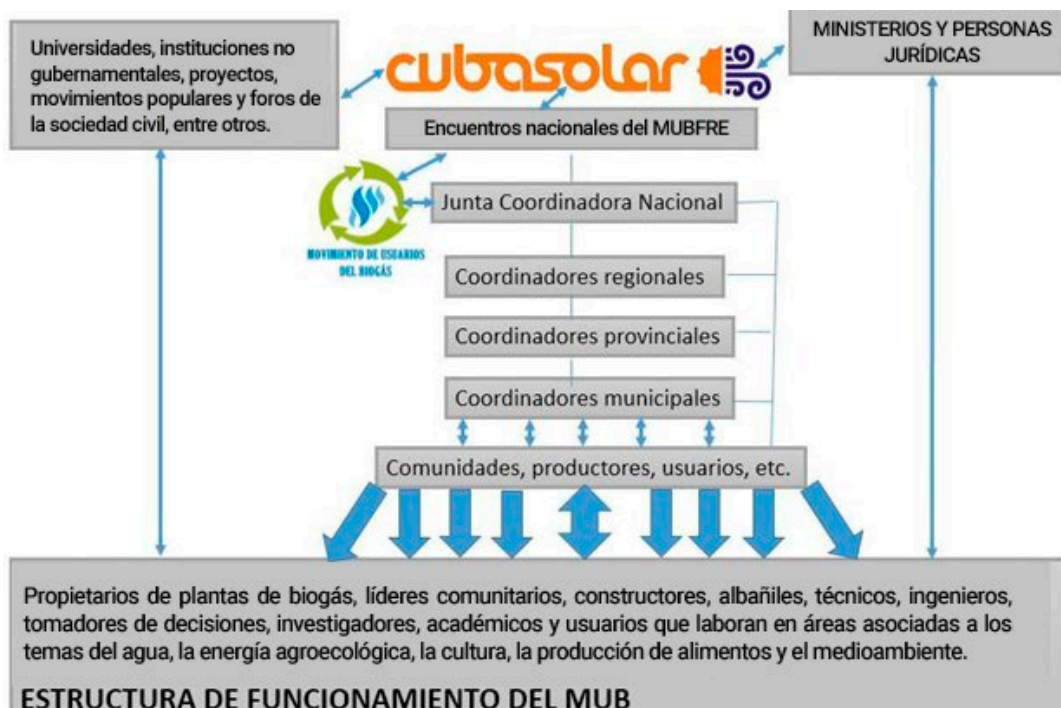
En su primer período la historia del MUB abarca cuatro etapas fundamentales:

1. La primera (1984-1994), caracterizada por la sensibilización y la capacitación;
2. La segunda (1994-2004), marcada por la promoción y aplicación de la tecnología;
3. La tercera (2004-2014), distinguida por su extensión e integración; y
4. La cuarta etapa (2014-2021), determinada por la organización y certificación.

A lo largo de estas etapas el MUB no solo ha alcanzado un trabajo consolidado, sino también ha participado o colaborado en la construcción de más del 80 % de los casi 4500 biodigestores construidos en el país. Por estas y otras razones, la Unión Panamericana de Ingenieros le otorgó a Cuba el Premio Panamericano de Desarrollo Sostenible Luis Wannoni Lander, por los logros obtenidos durante el período 1984-2014.

Sin embargo, considerando que el agua, la generación de energía y la producción de alimentos resultan imprescindibles para el desarrollo de un municipio y teniendo en cuenta los resultados obtenidos a la fecha por el MUB, se plantea la necesidad de transitar hacia otro movimiento más integral, que abarque además del biogás, otras FRE. Por tal motivo, en abril de 2014 la CUBASOLAR aprobó la creación de un grupo de trabajo del MUB y otras FRE, cuya sigla es MUBFRE (ilustración 83).

Ilustración 83. Estructura del funcionamiento del MUB



Durante la etapa de transición del MUB al MUBFRE se llevaron a cabo acciones de diagnóstico, capacitación y preparación con miras a su fortalecimiento, a fin de lograr una mejor calidad de vida con independencia energética y soberanía alimentaria. Todas ellas se ampliarán e implementarán fundamentalmente a partir de 2022, en los polígonos demostrativos, que son espacios físicos destinados a la demostración de diferentes prototipos de biodigestores y aplicaciones del biogás, los efluentes líquidos y los bioabonos, y que, por lo general, son los mismos lugares donde se han logrado experiencias exitosas.

De 2022 a 2030 el MUBFRE deberá convertirse en un movimiento capaz de respaldar procesos locales en su concepción más amplia. Dentro de sus objetivos fundamentales se incluye lograr una mayor integralidad en la promoción y el uso de las FRE, con una base auténticamente local, familiar y comunitaria. Además del biogás, el MUBFRE promueve el uso de la energía solar activa y pasiva, la producción sostenible de alimentos y todo aquello que signifique el uso de las FRE, con una participación y un control científico-popular. Las diferentes etapas del MUB y la fase prevista para su segundo período (MUBFRE) se muestran en la ilustración 84.

En los complejos y diversos escenarios que ha recorrido el MUB sus acciones han ido disminuyendo y no todas las experiencias han sido exitosas. Por lo tanto, queda un gran trecho por recorrer y un gran reto por enfrentar, sobre todo en el nuevo escenario. Entre los resultados más relevantes del movimiento se incluyen los siguientes:

- Se logró establecer un movimiento de usuarios del biogás que, con el empleo de la ciencia, la técnica y el ingenio popular, ha incentivado el conocimiento sobre esta tecnología y su aplicación en disímiles contextos del territorio nacional cubano.
- Se alcanzó una política descentralizada y un diálogo con los legisladores y la institucionalidad, dentro de los cuales el enfoque de aprender haciendo adoptado por los técnicos, productores y usuarios del biogás constituye un ejemplo de horizontalidad entre quienes ya poseen conocimientos y quienes inician el proceso de generar o adquirir saberes, lo que ha permitido la construcción de más de un millar de plantas de biogás en el país.
- El MUB, con su arraigo popular y consciente, ha sustentado un modelo de desarrollo que se debe seguir y que marca las pautas de un futuro promisorio para las FRE en Cuba.
- Se contribuyó a desarrollar diversas soluciones para el saneamiento energético-ambiental en diferentes territorios del país, así como a lograr que sectores alternativos puedan disponer del biogás como una fuente energética renovable para la cocción de sus alimentos.
- Se promovió la adopción de sistemas de tratamiento a ciclo cerrado con biogás derivado de residuos orgánicos, como una alternativa efectiva para la producción de energía y alimentos y el saneamiento ambiental en el contexto del desarrollo local.
- Se obtuvo la colaboración y el respaldo de muchas personas jurídicas y naturales que han contribuido significativamente a la obtención de resultados.

- En la actualidad se trabaja en la integración de todos los actores, redes, asociaciones, organizaciones y movimientos que llevan a cabo labores relativas al desarrollo del biogás en Cuba. Al respecto, la tarea de ordenamiento, aprobada por la máxima dirección del país, prevé una mayor participación de los actores de la sociedad cubana en los ámbitos público y privado.
- El MUB apoyó la implementación de la política energética del país, contribuyendo a la elaboración de los programas y las estrategias de desarrollo en torno al biogás en cada municipio y provincia.

6.1.1 Referencias bibliográficas

Guardado, JA. 2016. Biogás, energía positiva y desarrollo local: parte I. Revista Energía y Tú (73).

Guardado, JA; Fernández, GI. 2016. Biogás, energía positiva y desarrollo local: parte II. Revista Energía y Tú (74):9-14.

6.2 Redes y movimientos de biogás en Ecuador

Autora: Lisbeth Molina

6.2.1 Introducción

En Ecuador la primera aproximación hacia el establecimiento de una red activa de actores en el tema de la biodigestión y la producción de biogás se produce en 2015, con el surgimiento de la RedBioEc como un espacio para compartir experiencias y fortalecer los conocimientos en torno a esta tecnología. Desde entonces, la RedBioEc y otros actores han llevado a cabo talleres, cursos y encuentros con ese propósito, lo que ha permitido la participación de nuevos actores.

A pesar de los esfuerzos que se realizan, aún no se ha conseguido dar un salto hacia la masificación y la democratización de la tecnología de biodigestión en el país. El subsidio al GLP y a la energía convencional se considera el principal factor limitante en el proceso de adopción (Martí Herrero *et al.* 2019), mientras que, en los sistemas ya instalados, el seguimiento y el control se visualizan como las principales causas del abandono de los biodigestores, que restringen el aprovechamiento potencial del biogás y del biol como principales subproductos.

En este sentido, conocer a los actores del sector y las acciones que están implementando desde sus espacios reviste gran importancia en acoplar esfuerzos dirigidos a promover y ampliar las oportunidades para emplear la biodigestión como una herramienta efectiva y sostenible frente a la mitigación de los efectos del cambio climático.

El objetivo de este apartado es realizar un mapeo de los principales actores del sector de los biodigestores y el biogás en Ecuador, para generar un compendio actualizado que sirva como referente en la visualización de enfoques, acciones y nexos y que impulse el desarrollo de un ecosistema colaborativo en el país y la región.

Ilustración 84. Mapa de actores según su relevancia en su área de intervención



En la ilustración 84 se presenta información con respecto a los principales actores en el campo de los biodigestores en Ecuador. Se puede observar sobre todo sus tipos y su campo de acción. En los anexos a, b se presentan los actores de mayor relevancia en el país, de conformidad con su enfoque, resaltando la transversalidad entre ellos. Esta es una de las primeras aproximaciones, que apunta hacia la compilación de datos acerca de los actores involucrados en la biodigestión y la producción de biogás en Ecuador. La información obtenida por medio de entrevistas informales a varios actores del sector se resume a continuación.

6.2.2 Actores involucrados en el desarrollo y fortalecimiento de capacidades internas

6.2.2.1 RedBioEc

En 2015, en la Escuela Politécnica Nacional ubicada en Quito, se lleva a cabo un primer encuentro nacional de actores de la biodigestión, con alrededor de 100 participantes. En los posteriores años se ha ido impartiendo una serie de cursos teórico-prácticos introductorios y de seguimiento, referentes al diseño y dimensionamiento de los biodigestores, trabajándose únicamente modelos tubulares de plástico a pequeña escala con un enfoque doméstico y productivo.

En este sentido, hasta 2019 se habían efectuado instalaciones y talleres en las provincias de Imbabura, Azuay y Guayas, con alrededor de 170 participantes y 40 sistemas instalados, a través de un esfuerzo conjunto de organizaciones como la Coordinadora Ecuatoriana de Agroecología (CEA) y ONG como WISIONS y Green Empowerment.

En 2018 la RedBioEc celebró su segundo encuentro en la ciudad de Ambato, con alrededor de 100 participantes. Desde entonces, se prevé realizar pequeños encuentros regionales, que de momento se han detenido por la pandemia de COVID-19. Desde sus inicios la red ha procurado contar con la participación activa de campesinos y de representantes de instaladores, gobiernos

locales, ministerios y la academia en todas sus actividades, a fin de evaluar las necesidades de estos sectores y promover la incidencia práctica de la academia en el sector, formando vínculos que permitan fortalecer sus capacidades y compartir experiencias para impulsar la democratización de esta tecnología en el país (ilustración 85).

6.2.2.2 Actores gubernamentales

En el ámbito nacional, desde diferentes sectores gubernamentales se han desarrollado iniciativas para promover la adopción e implementación de la tecnología de los biodigestores, haciendo hincapié en los pequeños y medianos agricultores.

En 2014 el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables (MEER) publicó el primer *Atlas bioenergético* del país, en el que se muestra el potencial de generación de biogás a partir de diferentes residuos de la producción agrícola, así como su distribución geográfica. Posteriormente, desarrolló talleres participativos e instalaciones demostrativas de biodigestores tubulares de geomembrana. En esta misma línea, durante el período 2010-2012, el MAGAP, dentro de su programa de producción de bioinsumos y mediante las Escuelas de la Revolución Agraria, promovió la tecnología de biodigestores, llevando a cabo actividades de capacitación y cierto número de instalaciones de fomento al aprovechamiento del biol como fertilizante agrícola. El Ministerio de Ambiente (actualmente el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica) desarrolló el proyecto “Generación de capacidades para el aprovechamiento energético de residuos agropecuarios”, dirigido a promover el conocimiento en los ámbitos académico y de las asociaciones y los productores independientes, con incidencia también en la mediana industria de alimentos. En primera instancia, generó un manual para el análisis de tecnologías y experiencias relativas a los biodigestores en el país; posteriormente, publicó un manual para la instalación de biodigestores tubulares de geomembrana, con instalaciones demostrativas enfocadas en pequeños y medianos agricultores en las provincias de El Oro y Santo Domingo de los Tsáchilas (Martí Herrero *et al.* 2015). Después, este mismo ministerio solicitó asistencia técnica al Centro y Red de Tecnología del Clima (<https://www.ctc-n.org/>) de la ONU, la cual fue ejecutada por el Centro Internacional de Métodos Numéricos e Ingeniería (CIMNE) de España, junto con el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias y el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (actualmente el Instituto de Investigación Geológico y Energético de Ecuador [IIGE]), para desarrollar el Plan del Programa Nacional de Biodigestores, cuya finalidad es generar impacto en beneficio de 3500 familias con sistemas instalados y brindar capacitación a 71 instaladores no profesionales certificados (Martí Herrero *et al.* 2019).

6.2.2.3 Actores que impulsan un ambiente sano y resiliencia a escala doméstica y productiva

En Ecuador se han llevado a cabo iniciativas relevantes, como las de la CEA, el PNUD y el MEER, que, en colaboración con biodigestores Mundo Intag, han celebrado talleres y efectuado instalaciones prácticas para promover el establecimiento de fincas agroecológicas integradas con sistemas de biodigestión como tecnología anexa a los procesos productivos, a fin de aprovechar al máximo los recursos de la finca y empezar a considerar el biogás como una fuente de energía. Con la CEA se realizaron instalaciones en las provincias de Loja y el Azuay, con el antiguo MEER, en las provincias de Guayas y Orellana, y con el PNUD, en las provincias

de Guayas Napo y Pichincha. Su objetivo es que los participantes aprendan el proceso de instalación y mantenimiento de los biodigestores, para promover la sostenibilidad de la tecnología.

La CEA ha sido uno de los actores clave en la inserción sistemática de la tecnología de los biodigestores en el país, específicamente en la zona de Intag, provincia de Imbabura, donde inició en 2002 y hasta 2013 ya se habían instalado alrededor de 30 sistemas que cada vez iban acoplándose más a la propuesta agroecológica de los pequeños agricultores. Estos sistemas fueron el ensayo demostrativo que permitió expandir el conocimiento sobre la biodigestión entre los productores y algunos participantes de gobiernos locales, sin mayor incidencia de estos últimos. El interés creciente, principalmente entre los productores, permitió realizar nuevas instalaciones en Azuay, Loja y Cañar, cuya compilación de experiencias resultó gratificante, ya que muchos de los productores se convirtieron en instaladores. Actualmente la CEA brinda soporte a la RedBioEc para el desarrollo de talleres y encuentros.

En este mismo apartado es posible visibilizar la acción de actores como Green Empowerment, que llevó a cabo el proyecto CRECER en la provincia de Esmeraldas, en el que se implementaron 15 biodigestores aprovechables en los procesos productivos del cacao. A esta misma escala productiva esta organización efectúa en la actualidad el monitoreo experiencial de aplicaciones de fertilizantes obtenidos como subproducto de la biodigestión en cultivos de maíz, cacao y café, con resultados satisfactorios en procesos productivos de pequeña y mediana escalas. El enfoque actual de la organización ha pasado del soporte en la instalación directa de biodigestores al desarrollo de capacidades dirigidas a la formación de promotores para el seguimiento de la tecnología, con el objetivo de hacer una buena selección del beneficiario y trabajar en la sostenibilidad del proceso.

La academia desempeña también un papel fundamental para alcanzar la resiliencia a escala doméstica y productiva, por medio de la investigación en materia de sustratos aprovechables en los procesos de biodigestión para obtener buenos rendimientos de los subproductos (biogás y biol). Un ejemplo resaltable de la promoción de procesos de adopción de la tecnología en la provincia de Tungurahua es el de la Universidad Técnica de Ambato, que cuenta con biodigestores tubulares de geomembrana HDPE instalados en su campus y que ha desarrollado investigaciones en términos de retención hidráulica para evaluar la calidad de los bioles con aplicaciones prácticas en la zona, donde se han obtenido buenos resultados en los cultivos. En cuanto al biogás, se ha investigado el potencial del suero de la leche; no obstante, aún no se han efectuado aplicaciones prácticas, debido principalmente a la implementación de sistemas de filtrado del metano (ilustración 87).

Desde el enfoque del saneamiento ambiental, la Universidad Regional Amazónica trabaja actualmente de forma colaborativa con WISIONS, Green Empowerment, el IIGE y el CIMNE en la implementación de biodigestores de bajo costo como sistemas viables para el tratamiento de aguas residuales urbanas, a fin de repetir la experiencia en alguna comunidad rural de la provincia de Napo (IKIAM 2019). En el proceso se pretende realizar pequeños ensayos en los planos domiciliario y de pequeñas comunidades que ya cuentan con un sistema de alcantarillado.

Como parte de sus actividades de investigación y vinculación, otras instituciones, entre ellas la Universidad de las Fuerzas Armadas, están implementando biodigestores tubulares como un sistema de tratamiento de los residuos generados por los pequeños productores porcícolas de la sierra ecuatoriana.

Entre los usos del biogás a escala doméstica y productiva se destacan las experiencias de instaladores independientes que han ido creciendo como empresas, con un buen número de instalaciones, como son los casos de Biodigestores Mundo Intag; Biodigestores Ecuador; y Gustavo Acero, que actualmente trabaja en alianza con las empresas Energás Biogás y Henaselec como operador del Sistema Biobolsa en Ecuador.

En 2010 surgió la iniciativa **Biodigestores Mundo Intag**, impulsada por Robinson Guachamira, con base en la experiencia previa de formación de técnicos instaladores, impartida dentro de la Asociación de Campesinos Agroecológicos de Intag con la instalación inicial de 4 biodigestores. Robinson es actualmente el representante legal de dicha asociación, dentro de la cual se ha impulsado el uso de los biodigestores como herramienta para la agricultura familiar campesina, enfocándose principalmente en la producción de biol para las parcelas productivas y el aprovechamiento del biogás en cocinas que sustituyen a las de combustión con leña. Además, se ha empezado a considerar a los biodigestores como un atractivo para el turismo comunitario de las fincas (ilustración 86).

En el territorio de Intag se han instalado alrededor de 70 biodigestores, con una gran incidencia de la empresa Biodigestores Mundo Intag y el aporte de la RedBioEc y de otros organismos, como la CEA. Actualmente la empresa ha extendido su experiencia de instalación a otras provincias del país y ha colaborado con instituciones como el MEER, la ONG TRIAS, la Plataforma Urbana y de Ciudades y la misma CEA, promoviendo el concepto de reciclaje o aprovechamiento máximo de los recursos de la finca, en el que el biodigestor es una herramienta integral y multifuncional.

Biodigestores Ecuador, una empresa localizada al sur del país y representada por Gerardo Parra, inició sus operaciones en 2011. Se enfoca sobre todo en granjas porcícolas y lecheras medianamente grandes, así como en fincas integrales, donde el biogás, uno de los principales subproductos, se emplea en el calentamiento de camas de lechones y en cocinas domésticas. La empresa ha implementado proyectos en varias provincias de la nación, ha trabajado con instituciones estatales y ha compartido publicaciones, como la intitulada *Introducción de biodigestores en sistemas agropecuarios en el Ecuador*, en colaboración con otros actores. En la actualidad forma parte del programa de desarrollo comunitario de la Universidad EARTH y sigue extendiendo su experiencia en todo el país.

Gustavo Acero también ha venido instalando biodigestores de forma independiente y reuniendo experiencias a lo largo del Ecuador. Su formación es el fruto del fortalecimiento de capacidades que realizan instituciones como el Fondo Ecuatoriano Populorum Progressio, una institución privada con una finalidad social. Las instalaciones se ajustan a las condiciones de los clientes, que, por lo general, son granjas pecuarias de pequeña y mediana escalas. Actualmente Gustavo trabaja en alianza con la empresa colombiana Energás Biogás, cuyo principal enfoque es el aprovechamiento, la compresión del biogás y la instalación de generadores de energía eléctrica.

En Ecuador estos proyectos de instalación apenas están en ciernes, mientras que en Colombia se distribuyen de forma amplia y se orientan a contribuir a la construcción de sistemas comunitarios sostenibles, donde la principal fuente energética es el biogás.

La empresa Henaselec, orientada principalmente a la provisión de equipamiento agrícola, se enfoca en los sectores bovino y porcino, a través de la implementación del Sistema Bio, en alianza con la empresa que lleva este mismo nombre. En la actualidad sus instalaciones se están extendiendo por todo el país.

En la sierra centro-norte se encuentra Manolo Muñoz, quien, junto con la academia, ha estudiado nuevos sustratos procedentes de la cría de animales menores, como cuyes y conejos, cuya cría es común en la región sierra del país y cuya materia prima potencial para la biodigestión presenta buenas características para la obtención de un biol aplicable a parcelas productivas.

Por otra parte, en el ámbito nacional una figura representativa en este campo es María Rojas, del sur del Ecuador, quien instala de forma independiente biodigestores tubulares a pequeña escala y es una de las promotoras graduadas del proyecto de agrobiodiversidad impulsado por la Fundación Heifer Ecuador.

6.2.3 Actores relevantes en el sector industrial y en el desarrollo de nuevas tecnologías

En Ecuador algunas industrias han integrado un sistema de biodigestión en sus procesos productivos. Aquí se destaca solo un caso, a fin de ilustrar no solo la forma en que se está implementando la tecnología de biodigestión, sino también el aporte de la academia a la gestión sostenible de la agroindustria.

En 2016 la Escuela Politécnica Nacional, en coordinación con la empresa alemana FWE Energy Solutions (sistema BIOGASTIGER), TecoPesca y el Grupo KFC, evaluaron la viabilidad del aprovechamiento de residuos de la industria atunera y de alimentos para instalar biodigestores sofisticados junto con grandes productores de residuos orgánicos (Martí Herrero *et al.* 2017). A partir de dicha evaluación, la empresa KFC adoptó el sistema BIOGASTIGER y puso en operación las primeras centrales de inicio automático (*plug and play*) del país. Estas disminuyen las emisiones de las granjas industriales, producen biol por toneladas y transforman el biogás en energía eléctrica. A la fecha la empresa ha llevado a cabo análisis y estudios de factibilidad junto con la Escuela Politécnica Nacional y las universidades Católica y de San Francisco, ha tenido varios casos de éxito en sus operaciones y constituiría una de las primeras centrales en operar en la región insular del país, mediante un trabajo conjunto con el Fondo Mundial para la Naturaleza (Guerrero 2019).

6.2.4 Captura de metano por medio de rellenos sanitarios y disminución de emisiones de GEI

En el país solo existen dos plantas de captura de metano por relleno sanitario: la planta de biogás GASGREEN, que es el resultado de una alianza público-privada entre la empresa municipal de Quito EMGIRS y GASGREEN S. A.; y la planta de la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca, derivada de otra alianza público-privada entre esta y BGP ENGINEERS. El beneficio de ambas plantas en términos de la reducción de emisiones de GEI es considerable

(215 107 tCO₂ y 16 550 tCO₂, respectivamente); sin embargo, la forma en la que se manejan los residuos para aprovechar el metano no es la adecuada.

Si se promoviera la gestión de los residuos desde su origen, estos tendrían un gran impacto y un mayor potencial en cuanto a la producción de biogás y el reciclaje de nutrientes. En este sentido se destaca la gestión que realiza la Municipalidad de Cayambe y las iniciativas que en 2018 empezó a impulsar la comunidad de Ayora, con un modelo de gestión de residuos integrado entre los sistemas urbano y rural para el aprovechamiento energético del biogás en un parque agroecológico comunitario.

6.2.5 Conclusiones y lecciones aprendidas

En Ecuador la tecnología de la biodigestión aún tiene muchas aristas por desarrollar, como la difusión de los beneficios nacionales de los biodigestores como herramienta fundamental para alcanzar los objetivos de la agenda climática, no solo a través de la reducción de las emisiones de GEI, sino también de la promoción del reciclaje de residuos, su aprovechamiento energético en el sector industrial y la separación de residuos en su origen, así como para el saneamiento ambiental, orientado sobre todo a sectores rurales donde los sistemas de alcantarillado son deficientes o inexistentes.

En el país los sistemas de captura de metano por relleno sanitario resultan poco eficientes y sostenibles, ya que, aunque su beneficio en términos de emisiones es significativo, la disposición de los residuos para aprovechar el metano resulta inapropiada, puesto que se genera una gran cantidad de lixiviados contaminantes que no compensan la captura. En este sentido, se recalca la importancia de la promoción de la gestión y la clasificación de los residuos en su origen por parte de empresas públicas y privadas.

En Ecuador la participación de los diferentes actores se destaca desde varios enfoques y guarda una relación transversal y complementaria. Aunque se trata de una cooperación interna aún incipiente, dirigida a impulsar la investigación, el desarrollo del sector en los territorios, la generación de políticas específicas y la inserción de nuevas tecnologías de biodigestión accesibles, esta acción cooperativa es necesaria también para dar seguimiento a los sistemas instalados, garantizar su sostenibilidad, disminuir el abandono de la tecnología e incentivar aún más la adopción y la promoción de los biodigestores. Conocer en qué y cómo están trabajando actualmente los actores del sector desde diferentes áreas brinda una oportunidad para conectar sus acciones y fortalecer esta creciente red nacional.

6.2.6 Referencias bibliográficas

Guerrero, K. 2019. Biogastiger, la máquina de biogás: áreas de mayor potencial en Ecuador, ejemplos exitosos y desafíos (en línea). Consultado 16 de enero de 2022. Disponible en https://mediafra.admiralcloud.com/customer_609/0733e73d-4d32-43a2-b4e1-24d04e004372?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3D%2207_Karen_Guerrero_FWE_29_de_enero_de_2019_GYE.pdf.pdf%22&Expires=1666639379&Key-Pair-Id=APKAI2N3YMVS7R4AXMPQ&Signature=bkPmNTWOKxL2PyUC6FGJZmF4o5YlqK8zG GXVKf6e2ITbmD~OekxojuG0311A8SCW30pQJjAJV7JdDP0OeyQkkMzi~2gyFQc~DSD01 gim61fyPpbUoQU6dcj0miEv9uO3MxcZpVzsKIdBRmMzExtsHlxFRG1DltCJ72x9tmwVSIQI

0mHDmdPMif~R4OySD4FY99NcOuqLpB2lipVcwiRrPFn6a19Yzrru-
 VLJXg8qCF44awypfd6AA1~ymm7azFCtVipx9zHNnn9V6c-
 16MdtTVkA2ul~YIsCPHIMn9c0CQKSOPATQDfhoBkLvzLQAYTd5y3otrnsCJIz-g-
 PIB07veA__.

IKIAM (Universidad Regional Amazónica, Ecuador). 2019. Coordinación de Investigación e Innovación (en línea). Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en <https://www.ikiam.edu.ec/index.php/coordinacioninvestigacioninnovacion/>.

Martí Herrero, J. 2019. Latin American experiences in the democratization of biodigesters: contributions to Ecuador (en línea). Ecuador, CTCN. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/334431738_Latin_American_experiences_in_the_democratisation_of_biodigesters.

Martí Herrero, J; Andrade de Santiago, E; Hidalgo Medina, E; Parra Barrionuevo, G. 2015. Introducción de biodigestores en sistemas agropecuarios en el Ecuador: un aporte a la mitigación y adaptación del cambio climático y su aplicación (en línea). Quito, Ecuador, MA. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/336923423_Introduccion_de_Biodigestores_en_Sistemas_Agropecuarios_en_el_Ecuador.

Martí Herrero, J; Cuji, P; Ramírez, V; Rodríguez, L; López Domínguez, D; Cipriano, J. 2019. Hacia un sector de biodigestores sostenible en Ecuador: insumos para un componente de biodigestores de PNABE (en línea). CTCN, Ecuador. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/r4.1-20191210_programa_nacional_de_biodigestores_en_ecuador-ctcn.pdf.

Martí Herrero, J; Piedra Burbano, MA; Cuji, P; Ramírez, V; Rodríguez, L; López Domínguez, D; Cipriano, J. 2017. Actividad 1: línea base y demanda potencial técnica de biodigestores en Ecuador: análisis del contexto y tipologías de productores (en línea). Ecuador, CTCN. 66 p. Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/180114_e1.1_linea_base_ecuador_biogas.pdf.

7

CAPÍTULO

CAPÍTULO 7

CONSIDERACIONES FINALES SOBRE EL ESTADO ACTUAL DE LA BIODIGESTIÓN EN ALC

Los sistemas socioecológicos actuales enfrentan múltiples desafíos, como la degradación de los ecosistemas, la sobreexplotación de los recursos naturales, las desigualdades en el bienestar y los conflictos humanos, que comprometen el desarrollo sostenible de las sociedades. En ALC la vida rural se asocia con la marginación debido a la dificultad de acceso a la infraestructura y a los servicios básicos (CEPAL 2017), que supone un suministro deficiente o nulo de energía.

La DA, clasificada como fuente de energía renovable (por décadas encasillada en la misma categoría que la energía solar, hídrica o eólica) o método de tratamiento o gestión de residuos orgánicos líquidos y sólidos (lo que realmente es cuando se carece de subsidios para producir biocombustibles a partir de maíz u otros cultivos energéticos), es una de las formas de gestión circular que histórica y espontáneamente se ha utilizado por el hombre sobre el planeta tierra, una de las formas de tratamiento, con aprovechamiento energético y de reciclaje de materia orgánica, más limpio y eficiente en términos socioeconómicos. Permite simultáneamente mitigar la contaminación que estos residuos podrían producir y generar biogás (un combustible gaseoso muy versátil), así como una corriente residual (digerido) con un alto contenido de carga orgánica y de nutrientes. Al hacer uso del biogás se evita que el metano contribuya al calentamiento global. De acuerdo con las últimas metodologías de medición, en el marco de 20 años de vida, se calcula que, como GEI, el metano es 86 veces más potente que el CO₂.

El biogás representa una fuente de energía limpia, que no genera ni emite sustancias nocivas que producen bioacumulación, enfermedades crónicas y los pasivos ambientales asociados a las cenizas derivadas de la termovalorización, la incineración o la gasificación de los residuos sólidos municipales. Por lo tanto, resulta ideal para reemplazar otros combustibles. Este aspecto es, además, esencial para el reciclaje de nutrientes, dado que el digerido obtenido como subproducto de este proceso es rico en materia orgánica y nutrientes, por lo que se puede utilizar como fertilizante biológico, ya que se emplean solo residuos orgánicos en el biodigestor.

La DA se presenta además como una alternativa valiosa a las prácticas habituales de tratamiento de la FORSU. El aprovechamiento de la energía contenida en la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales permitiría reemplazar una fracción de los combustibles de origen fósil que actualmente dominan las matrices energéticas a lo largo de ALC. Asimismo, se puede combinar el uso de esta tecnología con acciones de recuperación y reciclaje que impactan positivamente en la mitigación de los efectos del cambio climático. Para aprovechar los residuos orgánicos municipales se requieren esfuerzos adicionales dirigidos al desarrollo de la DA seca.

Además de transformar un residuo en energía, mediante esta tecnología se puede generar empleo y agregar valor en el origen a la producción de forma sostenible. Para lograr el adecuado funcionamiento de la DA y contribuir a su adopción masiva es necesario conocer el potencial de producción de biogás por medio de la biomasa local; desarrollar digestores

adaptados al ambiente y a los esquemas organizativos del lugar; avanzar en las estrategias de uso del biogás y el digestato, conociendo las demandas de sus usuarios; y contar con normativas y herramientas de promoción de esta tecnología.

En este libro se presentan muchos casos exitosos a lo largo de ALC que demuestran que la DA resulta perfectamente viable, útil y deseable en diversos escenarios, donde es posible proponer múltiples y versátiles usos en diferentes escalas. Es necesario que los gobiernos de la región ofrezcan condiciones favorables para impulsar la inversión en esta tecnología, a través de una fiscalización más estricta o de herramientas de impulso y promoción de estos proyectos. Todo esfuerzo de este tipo requerirá una planificación para remediar la falta de capacidades técnicas para mantener los proyectos en operación. Debido a que aún es poco conocida, se recomienda el desarrollo y la implementación paulatina y articulada de esta práctica entre todos los actores. La colaboración y el establecimiento de alianzas y redes entre los países latinoamericanos ayudarían a potenciar sus capacidades individuales en torno a la DA.

Para facilitar la adopción de los biodigestores familiares entre los nuevos usuarios es indispensable optimizar el uso de los productos de la DA (biogás y digestato), considerando las necesidades y oportunidades locales, con base en la idiosincrasia y las prácticas locales de preparación de alimentos y las necesidades productivas.

En los casos de la agroindustria, los municipios y los grandes gestores de residuos orgánicos, las posibilidades de aprovechamiento del biogás y el digestato se amplían para su consumo, venta, aprovechamiento o disposición final; no obstante, recomendamos planificar el uso de los productos de la DA para responder a las necesidades locales y luego pasar a otras formas de uso más complejas.

A fin de que la tecnología finalmente se instale y afiance en la región, es necesario que los tomadores de decisiones (concejos municipales, ministerios, gestores de residuos, agencias de desarrollo agrícola y medioambientales, etc.), inversionistas, técnicos de proyectos rurales, agrupaciones de productores agroecológicos y de frutas, hortalizas, carne, leche y huevos y muchos otros actores sepan lo que significa instalar, poner en marcha, operar y mantener en funcionamiento un biodigestor. Conocer las normativas y los reglamentos de seguridad adaptados a las diferentes escalas permitirá diseñar instalaciones según las necesidades y posibilidades reales de cada contexto, así como invertir con mayor seguridad en un proyecto de DA. De esta manera los costos de inversión y operación de los biodigestores, el modelo de negocios en el largo plazo y las necesidades técnicas de operación serán previstas y consideradas en los proyectos desde su inicio. El marco normativo resulta esencial para el desarrollo de este tipo de proyectos; sin embargo, en algunos países de América Latina este fue inspirado por las experiencias de países del norte con realidades totalmente diferentes de las de ALC. Los autores de este libro consideran que estos marcos siempre deben tomar en consideración las realidades propias del país y del sur global, sobre todo en las escalas familiares.

A quienes desean instalar plantas de producción de alimentos y bebidas o planteles ganaderos, de carne, leche o huevos les invitamos a evaluar los costos de inversión y operación de diferentes alternativas de tratamiento de RILES y residuos orgánicos y a compararlos con los

de la DA, una herramienta que vuelve viables los procesos productivos que sin ella resultarían muy contaminantes en el largo plazo. Para ello se deben considerar los ciclos completos de uso y generación de energía, calor y/o electricidad y bioabono (digestato y biol) y, por lo tanto, el ahorro a partir del abastecimiento autónomo y descentralizado de un biodigestor, que posibilita reemplazar el uso de combustibles fósiles a partir de la energía autogenerada. Cabe destacar que en los últimos años y, sobre todo, a escalas pequeña y mediana, el ahorro en fertilizantes ha cobrado relevancia, ya que permite utilizar el digestato en la agricultura. A quienes hayan evaluado la generación energética de un biodigestor solo en términos económicos y la viabilidad de un proyecto de biogás meramente analizando los ingresos por concepto de venta de electricidad o biocombustible, les decimos que este proceso no ocurre si no se dispone de biomasa orgánica residual y, por lo tanto, el biodigestor no será necesariamente un negocio lucrativo aparte del negocio que de manera previa genera los residuos, sino que se trata sobre todo de una tecnología esencial para hacer viables los procesos productivos, a fin de lograr la sostenibilidad ambiental en el largo plazo.

En un planeta con recursos finitos y una creciente población, la producción de alimentos y energía bajo restricciones ambientales cada vez más severas exige a los actuales sistemas agrícola, agroindustrial y de gestión de residuos sólidos municipales una transformación de los sistemas productivos lineales en sistemas circulares. La DA contribuye a mantener los productos, componentes y materiales en su más alto grado de utilidad, preservando y aumentando el capital natural, optimizando el rendimiento de los recursos y minimizando los riesgos del sistema mediante un adecuado manejo de existencias finitas y flujos renovables. Algunos de los beneficios que la masificación de la DA ofrece guardan relación con ventajas innovadoras y competitivas, la reducción de los costos productivos, la independencia de insumos externos, la disminución en el consumo de energía y en la emisión de CO₂ y una mayor seguridad de la cadena de suministro y recursos en los espacios urbano-rurales. Dentro de este esquema la DA cumple un rol protagónico, en el que los biodigestores pueden formar parte de una biorrefinería capaz de procesar residuos para producir compuestos de alto valor en forma de energía y fertilizantes, fuentes de todo tipo de vida en el planeta.

Considerando el potencial y el capital humano disponibles en América Latina, así como las experiencias expuestas en este libro, estamos convencidos de que, por medio de la generación de conocimientos y el desarrollo del sector de los biodigestores, la región puede alcanzar su soberanía alimentaria y energética y, a la vez, contribuir de manera significativa a enfrentar la crisis climática global y los cambios de paradigma que estamos viviendo.

La RedBioLAC nació con el objetivo de unir a quienes desarrollamos e implementamos esta tecnología, a fin de que el sector siga creciendo. En este sentido, resulta fundamental la colaboración y las sinergias que podemos fomentar en América Latina. La rueda ya está inventada, solo se requiere hacerla girar.

ANEXOS

ANEXOS

a. Mapeo de los actores del sector de la biodigestión en Ecuador.

Nombre de la empresa/ organización/ persona natural	Rol	Descripción	Tecnología de biodigestión	Contacto
Red de Biodigestores de Ecuador (RedBioEc)	Red de integración de actores del sector de la biodigestión	<p>Actividades: Desde 2015 ofrece un espacio para compartir experiencias y conocimientos entre actores de diversos ámbitos, enfocándose principalmente en los pequeños productores y en agricultores o asociaciones vinculadas a la agroecología.</p> <p>Campo de acción: Celebra encuentros nacionales y talleres prácticos de instalación de biodigestores a pequeña escala.</p>	<p>Biodigestores tubulares de plástico de polietileno</p> <p><i>Enfoque:</i> aprovechamiento del biogás en cocinas y del biol en cultivos.</p>	<p>Coordinación: Samuel Schlesinger Tel.: +593 99 655 56 88 Robinson Guachagmira Tel.: +593 97 902 25 78</p>
Green Empowerment	Organización no gubernamental	<p>Actividades: Desde 2005 trabaja con socios locales y comunidades rurales, brindando apoyo técnico y administrativo para mejorar el acceso de poblaciones vulnerables a energías renovables, agua potable y saneamiento.</p> <p>Campo de acción: Difunde conocimientos sobre la biodigestión y desarrolla proyectos comunitarios y de apoyo técnico y gestión financiera en respaldo a la RedBioEc.</p>	<p>Biodigestores familiares tubulares de plástico de polietileno</p> <p><i>Enfoque:</i> generación de gas para la combustión en cocinas.</p>	<p>Samuel Schlesinger, Gerente de Programas de América Latina Tel.: +593 99 655 56 88 Correo electrónico: sam@greenempowerment.org https://greenempowerment.org/ecuador/</p>

<p>Coordinadora Ecuatoriana de Agroecología (CEA)</p>	<p>Red de articulación de productores agroecológicos</p>	<p>Actividades: Desde 2002 promueve el uso de biodigestores y los instala, junto con productores agroecológicos y asociaciones. Integra la tecnología de biodigestión en fincas agroecológicas. Campo de acción: Promueve y difunde conocimientos orientados a gobiernos locales y pequeños productores, ofrece apoyo técnico para la instalación de biodigestores y brinda capacitación para que los productores se conviertan en instaladores.</p>	<p>Biodigestores familiares tubulares de plástico <i>Enfoque:</i> biogás para generar energía calórica aprovechable en fincas, con énfasis en el biol como abono para cultivos agroecológicos.</p>	<p>Oficina de la CEA: Tel.: +593 2 25 29 07 Correo electrónico: info@agroecologia.ec https://www.agroecologia.ec/</p>
<p>Biodigestores Mundo Intag, Asociación de Campesinos Agroecológicos de Intag</p>	<p>Proveedor de servicios de diseño e instalación</p>	<p>Actividades: Instala biodigestores familiares a pequeña y mediana escalas y propone una alternativa turística comunitaria al promover la tecnología de biodigestión como parte de fincas integrales. Campo de acción: Brinda asistencia técnica para el diseño y la instalación de biodigestores y colabora en programas y proyectos.</p>	<p>Biodigestores de plástico y geomembrana de PVC a pequeña y mediana escalas. Sistemas individuales e interconectados <i>Enfoque:</i> almacenamiento de biogás y su aprovechamiento en cocinas Uso del biol en cultivos y en la obtención de bioabonos mejorados para el comercio.</p>	<p>Robinson Guachagmira, Gerente Propietario Tel.: +593 97 902 25 78 Correo electrónico: mundointag@gmail.com https://biodigestoresmundointag.blogspot.com/p/sobre-nosotros.html</p>
<p>Biodigestores Ecuador</p>	<p>Proveedor de servicios de diseño e instalación</p>	<p>Actividades: Instala biodigestores a mediana y gran escalas en granjas porcinas e integrales, lecherías y plantas de tratamiento de aguas negras. Campo de acción: Brinda asesoría técnica para la implementación de la</p>	<p>Biodigestores tubulares de geomembrana de cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno de alta densidad (HDPE)</p>	<p>Gerardo Parra Dirección General Tels.: +593 98 337 77 54, +593 99 419 40 34 Correo electrónico: asesoria@biodigestoresecuador.com</p>

		tecnología y la participación en el programa de desarrollo comunitario de la Universidad EARTH.		https://biodigestoresecuador.com/
Henaselec, Sistema Biobolsa	Proveedor de servicios Distribuidor del Sistema Biobolsa en Ecuador	Instala el Sistema Biobolsa para el saneamiento ambiental a mediana y gran escalas, dirigido a lecherías y granjas porcinas.	Biodigestores tubulares de geomembrana de polietileno Enfoque: biogás para generar energía mecánica	Marco Nasimba, gerente general Tels.: +593 98 829 94 76 y +593 98 797 55 08 Correo electrónico: gerencia.henaselec@gmail.com https://henaselec.com/
Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)	Institución de la academia dedicada a la investigación	Actividades: Lleva a cabo actividades de investigación, generación, transferencia y difusión de conocimientos y tecnologías ligadas al aprovechamiento de la biomasa para generar bioenergía o bioproductos. Campos de investigación específicos: efectúa investigaciones en materia de tratamiento de la biomasa y de aguas residuales, saneamiento ambiental, biodigestores de bajo costo a escala real y repetición de proyectos en comunidades.	Enfoque en análisis y estudios de factibilidad de sustratos	Dirección general, proyectos de la ESPE Tel.: +593 2 398 94 00 Correo electrónico: comunicacion@espe.edu.ec
Universidad Regional Amazónica Grupo de Investigación Biomass to Resources	Academia e investigación	Actividades: Lleva a cabo operaciones de investigación y de generación, transferencia y difusión de conocimientos y tecnologías ligadas al aprovechamiento de la biomasa para generar bioenergía o bioproductos. Campos de investigación específicos: Realiza investigaciones sobre tratamiento de biomasa y de aguas	Biodigestores tubulares Enfoque: saneamiento de aguas residuales.	Yanet Villasana Aguilera, directora del Grupo de Investigación Tel.: +593 982 29 06 79 Correo electrónico: Yanet.villasana@ikiam.edu.ec https://www.ikiam.edu.ec/index.html Jaime Martí Herrero, profesor titular Correo electrónico: jaimemarti@ikiam.edu.ec

		residuales, saneamiento ambiental, biodigestores de bajo costo a escala real y repetición de proyectos en comunidades.		
Universidad Técnica de Ambato	Academia e investigación	Actividades: Lleva a cabo operaciones de investigación y transferencia de conocimientos Campo de acción: Efectúa investigaciones acerca de sustratos aprovechables	Biodigestores tubulares de geomembrana de HDPE de flujo continuo <i>Enfoque:</i> obtención de biol.	Manolo Sebastián Muñoz Espinoza Tel.: +593 99 138 39 41 Correo electrónico: mmunoz@uta.edu.ec
Universidad San Francisco de Quito Instituto de Desarrollo de Energías y Materiales Alternativos (IDEMA)	Academia e investigación	Actividades: Realiza operaciones de investigación de procesos fisicoquímicos de transformación de la biomasa agroindustrial para optimizar su aprovechamiento como biocombustible, biofertilizante y precursor químico de origen biológico, entre otros. Campo de acción: Lleva a cabo acciones en los ámbitos de la academia, la investigación y brinda servicios de asesoría y consultoría a empresas públicas y privadas en toda América.	Biodigestores tipo domo de acero y de vidrio con sistemas <i>batch</i> y <i>semibatch</i> <i>Enfoque:</i> obtención de energías alternativas y renovables (bioetanol, biogás, ácidos orgánicos y bioles).	Gertrud Daniela Almeida Streitwieser, directora de la IDEMA USFQ Tel.: +593 2 297 17 00, ext.: 1420 Correo electrónico: dalmeida@usfq.edu.ec https://www.usfq.edu.ec/
Ministerio de Agricultura y Ganadería	Institución gubernamental	Campo de acción: Desarrolla un programa de bioinsumos, empleando la tecnología de biodigestión. A través del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, ha colaborado en el establecimiento de una línea de base sobre biodigestores en Ecuador. Actualmente, en alianza con el Centro	-----	-----

		Internacional de Métodos Numéricos e Ingeniería (CIMNE) y el Instituto de Investigación Geológico y Energético de Ecuador (IIGE), difunde información sobre experiencias en materia de democratización de biodigestores en Ecuador.		
IIGE	Institución gubernamental de investigación y desarrollo	Actividades: Desde 2014 opera en el país como entidad activa en la difusión e implementación de biodigestores. Actualmente participa en el Plan Nacional de Biodigestores y en la publicación de experiencias en torno a la democratización de esta tecnología en el país.	----	Paola Cuji, analista técnico Correo electrónico: paola.cuji@geoenergia.gob.ec
Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables	Institución gubernamental	Campo de acción: Promueve el conocimiento sobre residuos utilizables en la generación de biogás, mediante la elaboración del primer Atlas Bioenergético de Ecuador. En la actualidad se centra en la implementación de energías renovables para producir electricidad.	Biodigestores tubulares de geomembrana <i>Enfoque:</i> instalaciones demostrativas de aprovechamiento del biogás y el biol.	----
Ministerio del Ambiente (MAE)	Institución gubernamental	Actividades: Desde 2015 ha brindado asistencia técnica a pequeños y medianos productores y ha contribuido a la difusión del conocimiento, generando materiales de capacitación como el <i>Manual para el análisis de experiencias de biodigestores</i> , el <i>Manual para instalar</i>	Biodigestores tubulares de geomembrana <i>Enfoque:</i> instalaciones demostrativas de aprovechamiento del biogás y el biol.	Karina Barrera Moncayo, Subsecretaría de Cambio Climático Correo electrónico: karina.barrera@ambiente.gob.ec

		<i>biodigestores tubulares</i> y el Proyecto de Generación de Capacidades para el Aprovechamiento Energético de los Residuos Agropecuarios.		
CIMNE Centro y Red de Tecnología del Clima (CTCN)	Asistencia técnica internacional	Actividades del CIMNE: Desde 2014 participa en la transferencia de conocimientos y en la incidencia en las políticas públicas, proporcionando aportes a organismos estatales como el IIGE. Actividades del CTCN: Desde 2018 brinda asistencia técnica al MAE para el desarrollo del Programa Nacional de Biodigestores y promueve el fortalecimiento de capacidades y redes.	-----	Jaime Martí Herrero, investigador asociado Correo electrónico: jaimemarti@cimne.upc.edu
Instaladores independientes	Proveedores de servicios de diseño e instalación	Lleva a cabo la instalación de biodigestores tubulares a pequeña y mediana escalas.	Biodigestores de geomembrana de PVC y HDPE	Biodigestores Ambato: Manolo Muñoz Tel.: +593 99 138 39 41 Energás Biogás Gustavo Acero Tel.: +593 99 080 07 30 María Rojas Tel.: +593 99 476 62 17

Fuente: Elaborado con base en Martí 2019.

ii. Referencias bibliográficas

CEPAL (2017) Inversiones en infraestructura en América Latina: tendencias, brechas y oportunidades. Chile, Naciones Unidas.

Martí Herrero, J. 2019. Latin American experiences in the democratization of biodigesters: contributions to Ecuador (en línea). Ecuador, CTCN.

Consultado 3 de noviembre de 2022. Disponible en

https://www.researchgate.net/publication/334431738_Latin_American_experiences_in_the_democratisation_of_biodigesters.

b. Redes y movimientos en el sector de los biodigestores y el biogás en Ecuador.

Ilustración 85. Trabajo de la Red de Biodigestores del Ecuador (RedBioEc) y su conexión con otros actores del sector para expandir el conocimiento teórico-práctico de la biodigestión en el país



Ilustración 86. Aporte de Biodigestores Mundo Intag y cooperación entre varios actores en talleres realizados por la RedBioEc, la Coordinadora Ecuatoriana de Agroecología e instalaciones independientes en torno a la utilidad del biogás a escala doméstica y productiva



Ilustración 87. Instalación de un biodigestor en la provincia de Tungurahua con fines de aprovechamiento productivo



**LISTA DE
AUTORES,
COORDINADORES
Y SUS FILIACIONES**

LISTA DE AUTORES, COORDINADORES Y SUS FILIACIONES

- 1) Adriano Henrique Ferrarez es profesor e investigador del Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología Fluminense, Campus Itaperuna, Río de Janeiro, Brasil. Desarrolla estudios sobre el uso del biogás obtenido a partir de residuos agrícolas y agroindustriales como fuente de energía.
- 2) Agustín Torroba es Licenciado en Economía, Magíster en Energías por la Universidad de Buenos Aires, Diplomado en Economía de la Energía y Planeamiento Energético (IEA-COPIME) y Diplomado en Evaluación de Proyectos de Energías Renovables y Almacenamientos en la Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Buenos Aires (UCEMA). Fue Director Nacional de Biocombustibles en el Ministerio de Energía de Argentina. Actualmente, es Especialista Internacional en Biocombustibles y Energías Renovables en el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), instituto especializado de la Organización de Estados Americanos (OEA)
- 3) Alexandra Salinas Salinas es zootecnista de la Universidad Nacional de Colombia y especialista en Ambiente y Desarrollo Local. Posee una maestría en Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental. Se desempeña como investigadora y docente en Extensión Agropecuaria. Su trabajo se centra en las áreas de coordinación, planificación, organización, toma de decisiones, manejo de presupuestos, fortalecimiento de capacidades locales e institucionales y gestión de proyectos ambientales, agropecuarios y de cooperación internacional.
- 4) Alfredo Curbelo Alonso posee un doctorado del Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA) de Cuba.
- 5) Alfredo Erlwein es agrónomo. Posee una maestría en Holística y un doctorado en Sustentabilidad en Bioenergía. Se desempeña como académico en la Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias y en el Centro Transdisciplinario de Estudios Ambientales de la Universidad Austral de Chile. Lleva a cabo investigaciones en análisis sistémico de biocombustibles, con énfasis en gestión de residuos orgánicos, bosques y ordenamiento ecosistémico del territorio rural.
- 6) Andrea Tamayo Londoño es ingeniera biológica. Tiene una maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Se desempeña como docente e investigadora en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Actualmente implementa proyectos relacionados con el aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y el modelado de estos procesos. Es miembro de la Red Colombiana de Energía de la Biomasa de Colombia y la Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe (RedBioLAC).

- 7) Carol Elvir Barahona es ingeniera en Ciencias Ambientales y magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cantabria, España. Posee 20 años de experiencia en las áreas de gestión ambiental, evaluación del impacto social y ambiental, así como asistencia técnica de proyectos en el marco del desarrollo sostenible.
- 8) Celestina Brenes-Porras es costarricense, politóloga de la Universidad de Costa Rica (UCR) e Internacionalista de la Universidad Nacional (UNA) con énfasis en política comercial. Tiene experiencia en el análisis de proyectos de ley, cooperación internacional y comercio, coordinación de proyectos, investigación y facilitación de espacios de diálogo. Actualmente es especialista en el Programa de Innovación y Bioeconomía del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), instituto especializado de la Organización de Estados Americanos (OEA)
- 9) Cláudio Leite de Souza es ingeniero civil de la Universidad Federal de Viçosa, Brasil. Posee una maestría y un doctorado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Se desempeña como profesor asociado del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la UFMG. Trabaja en investigaciones acerca de la remoción de gases disueltos en efluentes de reactores anaerobios y la digestión anaerobia de residuos orgánicos.
- 10) Eliana Sotomayor es ingeniera agrónoma de la Universidad Austral de Chile. Coordina y apoya proyectos nacionales e internacionales vinculados con la ciencia, el desarrollo de comunidades rurales, la formulación de medidas de adaptación al cambio climático y el estudio y uso de energías renovables no convencionales como el biogás y la valorización del digestato.
- 11) Ernesto Barrera Cardoso posee un doctorado de la Universidad de Sancti Spíritus José Martí Pérez (UNISS), Cuba.
- 12) Federico Vargas Lehner es ingeniero en Ecología Humana y magíster en Innovación. Desde 2008 labora como docente investigador en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, en el área de ecología humana y agroecología.
- 13) Florencia Rivarosa es licenciada en Biotecnología. Se desempeña como docente titular de Procesos Biotecnológicos, ayudante de la coordinación de la licenciatura en Gestión de la Tecnología y miembro del Laboratorio de Tecnologías Ambientales del Centro de Investigación Aplicada (UNRaf Tec) de la Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf), Argentina.
- 14) Gabriela Bonassa es doctora en Ingeniería Agrícola de la Universidad Estatal del Oeste de Paraná, Brasil. Labora en las áreas de tratamiento de residuos, manejo de digestato, remoción de nitrógeno (proceso anammox) y producción de biogás. Actualmente es asistente técnico del Instituto 17, en el ámbito del Programa Energía para Brasil y del Foro Sur de Brasil sobre Biogás y Biometano. Además, lidera el grupo Mujeres del Biogás de Brasil.

- 15) Gloria Pedraza Ordonez es Bióloga, M.Sc. Desarrollo Sostenible de Sistemas Agrarios, estudios de Doctorado en Ciencias Ambientales. Coordinadora del Área de Sistemas Acuáticos del CIPAV (www.cipav.org.co). Coordinadora Webinars IICA- RedBioLAC. Experiencia en conservación, uso y manejo del agua, tratamiento de aguas usadas con biodigestores y plantas acuáticas, reciclaje de residuos en fincas y acompañamiento y seguimiento técnico a proyectos ambientales de investigación y desarrollo.
- 16) Ileana Pereda Reyes posee un doctorado de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba.
- 17) Jéssica Andrea Agresott es ingeniera química de la Universidad de América y estudiante de maestría en Ingeniería Química. Trabaja como investigadora de la corporación sin ánimo de lucro Centro de Desarrollo Industrial (CenDI) de Colombia.
- 18) Jesús Suárez Hernández posee un doctorado de la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (EEPFIH) de Cuba.
- 19) Joaquín Víquez es el director del Programa de Innovación e Impacto de Green Empowerment. Es ingeniero agrónomo, magíster en Ingeniería Ambiental y en Administración de Negocios y especialista en biogás.
- 20) José Antonio Guardado posee un doctorado. Es miembro de la Junta Directiva Nacional de la Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental y coordinador del Movimiento de Usuarios del Biogás (MUB). Se le otorgó el Premio a la Vida y Obra de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y de la Unión Panamericana de Ingenieros.
- 21) José Carlos Aucancela es cofundador del Proyecto Aukasiswa. Es ingeniero agropecuario y especialista en proyectos de desarrollo y reactivación productiva. Es el fundador de proyectos de emprendimiento agropecuario basados en el comercio justo, la agroindustria y el empoderamiento de la mujer rural. Es miembro del Cuerpo de Liderazgo del Climate Reality Project, GdT Bioles en la RedBioLAC y Global Shaper de Quito, Ecuador.
- 22) José Luis Betelu es ingeniero industrial. Es responsable del área de biogás de la empresa Buenos Aires Gas S. A., una unidad de negocios abocada al desarrollo de proyectos de biogás y biometano para su distribución por redes.
- 23) José María Rincón es químico y profesor emérito de la Universidad Nacional de Colombia. Es el fundador del CenDI.
- 24) Julio Pedrasa Gárciga posee un doctorado de la UNISS, Cuba.
- 25) Laura Marcela Mantilla Ávila es estudiante de maestría en Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, Colombia e ingeniera de Proyectos de Novatio SAS. Cuenta con experiencia en el desarrollo de protocolos de laboratorio para la caracterización de sustratos y digestatos, la instalación de biodigestores, el seguimiento a su operación y la gestión de proyectos de biodigestión a escala rural.
- 26) Lisbet M. López González posee un doctorado de la UNISS, Cuba.

- 27) Lisbeth Judith Molina Sandoval es ingeniera en Biotecnología de los Recursos Naturales de la Universidad Salesiana del Ecuador. Se desempeña como consultora independiente. Es la fundadora de BIOEC Conservation, una comunidad que promueve la gestión sostenible de los recursos y los residuos en el país. Es miembro de la RedBioLAC y de BIOEC S. A.
- 28) Luis Cepero Casas posee una maestría. Se desempeña como investigador auxiliar, profesor asistente y responsable del Laboratorio de Bioenergía y Residuales de la EEPFIH de la Universidad de Matanzas, Ministerio de Educación Superior, Cuba. Su actividad científica está vinculada a las fuentes renovables de energía para el medio rural (biogás, gasificación y biodiésel), desarrollada junto a la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, OIKOS-Portugal, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y la Unión Europea. Es miembro de la Junta Nacional del MUB.
- 29) María Aneley Routier es ingeniera ambiental. Se desempeña como docente y coordinadora de la diplomatura universitaria en Eficiencia Energética y Energías Renovables de la UNRaf. Además, funge como coordinadora del Laboratorio de Tecnologías Ambientales del UNRaf Tec de esa misma universidad.
- 30) María Mercedes Echarte es investigadora del Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible (IPADS-Balcarce). Se desempeña como docente en la Universidad Nacional de Mar del Plata. Es bioquímica y doctora con orientación en Biofísica de la Universidad de Buenos Aires. Es la directora del Laboratorio de Biomasa y Bioenergía del IPADS-Balcarce. Actualmente lidera el proyecto "Unidad demostrativa de producción de biogás en un pueblo rural (Los Pinos)" y dirige tesis de posgrado enfocadas en la digestión anaerobia.
- 31) Mariela Pino Donoso, obtuvo una maestría en Alemania (CUAS), y es Ingeniera Agrónoma de la Universidad de Chile. Es activista y una apasionada de la vida bajo el enfoque basura cero y de la digestión anaeróbica de residuos biodegradables. Es miembro de Alianza Basura Cero Chile. Actualmente se desempeña como coordinadora del Programa de Apoyo a Miembros para América Latina en la Alianza Global por Alternativas a la Incineración (GAIA).
- 32) Miriam Cleide Cavalcante de Amorim es gestora pública de arreglos productivos locales y especialista en gestión ambiental. Posee una maestría en Ingeniería Química de la Universidad Federal de Paraíba y un doctorado en Ingeniería Química de la Universidad Federal de Pernambuco (UFPE). Es profesora adjunta de la Universidad Federal del Valle de San Francisco. Lidera el Grupo de Investigación sobre Saneamiento Ambiental en los Medios Rural y Urbano en el Valle de San Francisco.
- 33) Nadia Gabbanelli es estudiante de doctorado del IPADS-Balcarce y de doctorado en Ciencias en el área de biología de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Asimismo, realiza estudios en el Laboratorio de Biomasa y Bioenergía del IPADS-Balcarce. Actualmente trabaja en la optimización de la producción de biogás en condiciones psicrófilas.

- 34) Nelida Pose es licenciada en Química y especialista en producción vegetal. Se desempeña como profesora adjunta de las asignaturas Introducción a la Química y Química Analítica General en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. Es miembro del Laboratorio de Biomasa y Bioenergía de la Unidad Integrada INTA-FCA.
- 35) Osmer Ponce es ingeniero en Ciencias Ambientales. Posee una maestría en Gestión de Energía Renovable de la Universidad Tecnológica Centroamericana de Honduras y otra en Energía Renovable y Eficiencia Energética de la Universidad del Rey Juan Carlos de España. Posee más de 10 años de experiencia en materia de energía renovable, cambio climático, huella de carbono y evaluación y monitoreo de proyectos.
- 36) Paula Tereza De Souza e Silva es licenciada y magíster en Química del Departamento de Química Fundamental de la UFPE. Posee un doctorado con doble título "cotutela" entre el Departamento de Química Fundamental de la UFPE y el Instituto Nacional Politécnico de Lorena, Francia y cuenta con un posdoctorado de este mismo instituto.
- 37) René Lauredo Pons posee una licenciatura. Labora en la Empresa Agropecuaria Nacional en La Habana, Cuba.
- 38) Roberto Sosa Cáceres es doctor de CUBAENERGÍA, Cuba.
- 39) Rodolfo Daniel Silva Martínez se desempeña como doctor investigador del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Es ingeniero civil y doctor en Bioenergía. Es un apasionado de la gestión de residuos, con una sólida experiencia en investigaciones y consultorías en materia de tratamiento de residuos sólidos orgánicos y aguas residuales, sostenibilidad y política ambiental.
- 40) Tiago Borges Ferreira es ingeniero ambiental de la Universidad de Uberaba. Posee una maestría en Hidráulica y Saneamiento de la USP y un doctorado en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG.
- 41) Valentina Savran se desempeña como ingeniera en la Dirección Provincial de Planificación Física en el municipio Cabaiguán, Sancti Spíritus, Cuba.
- 42) Viviana Solano Ramírez es ingeniera civil de la Universidad de Costa Rica y magíster en Saneamiento, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de la UFMG. Trabaja en el área de tratamiento anaerobio de efluentes y disposición de lodo de agua residual para uso agrícola.
- 43) Yanet Jiménez Hernández es doctora de la UNISS de Cuba.
- 44) Yasser Miguel Díaz Capdesuñer posee una maestría del Instituto de Investigaciones Porcinas de Cuba.

