

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN. EL PROGRAMA DE BIODIGESTORES EN YUCATÁN, MÉXICO

ROSARIO H. PÉREZ-ESPEJO¹
GRETEL I. CERVANTES-HERNÁNDEZ²

RESUMEN

En México, el manejo de excretas del ganado genera 19% del metano total emitido hacia la atmósfera; a la porcicultura corresponde el 19% de ese volumen y en el caso concreto de Yucatán, el 5.8%. Con el objetivo de reducir los gases de efecto invernadero, y capturar el metano, se implementó un programa en Yucatán de instalación de biodigestores en granjas porcícolas. Un incentivo de los porcicultores para participar en el programa fue la posibilidad de generar energía eléctrica. Esta investigación muestra que la mayoría de los biodigestores no están bien manejados y que, dadas las condiciones actuales del mercado de energía eléctrica, la inversión inicial nunca se recupera. El programa logra reducir la emisión de metano pero desestima la contaminación del agua que en Yucatán, por las características del suelo y del acuífero, es junto con la pérdida de biodiversidad, el problema ambiental de mayor trascendencia.

Palabras clave: captura de metano, programa de biodigestores, generación de energía eléctrica.

MITIGATION STRATEGIES. THE BIODIGESTER PROGRAM IN YUCATAN, MEXICO

ABSTRACT

In Mexico, slurry and manure management of farm animals generates 19% of the total methane emitted into the environment; pig production emits 19% of that volume and pig production in Yucatan 5.8%. In order to reduce greenhouse gas emissions, a program in Yucatan was set up to install biodigesters in pig farms to capture methane. An incentive for pig farmers to participate in the program was the possibility to produce electricity. This research demonstrates that most biodigesters

¹ Instituto de Investigaciones Económicas (IIEC), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), rosarioperez espejo@gmail.com.

² Egresada de la Maestría en Economía del IIEC, UNAM, gcervantesh@gmail.com.

in Yucatan have not been well managed and that, given the current conditions of the electric power market, the initial investment is never recovered. The program does manages to reduce methane emissions but, due to the characteristics of the soil and the aquifer, neglects the possibility of water pollution and loss of biodiversity, resulting in a major environmental problem.

Keywords: Methane capture, biodigesters' program, electric power generation.

INTRODUCCIÓN

En 2010, el sector agropecuario mexicano emitió 92 184.4 miles de toneladas (t) de bióxido de carbono equivalente (CO_2e), que representan 12.3% del total de los gases de efecto invernadero (GEI) que se arroja a la atmósfera (CICC 2012, 30). Las actividades agrícolas generan el 42% de ese total y las ganaderas, el 49%; el 9% restante proviene de su consumo de combustibles. La mayor parte de los GEI que produce la ganadería es metano (CH_4), un gas de gran potencia de calentamiento. De los 1 815.75 miles de t de CH_4 emitidos por la ganadería, 81% corresponde a la fermentación entérica y 19%, a los sistemas de manejo de estiércoles: 53.4% del metano proviene de los bovinos de carne y 19%, de los porcinos. La porcicultura de Yucatán estaría emitiendo 5.8% por este concepto y sería quinto lugar en el ámbito nacional (FAO y SAGARPA 2012, 36).

El problema de emisión de CH_4 a la atmósfera no reside en la porcicultura de Yucatán, sin embargo, en este estado y en otros del país, se puso en marcha un programa de instalación de biodigestores (BD) para capturar y quemar el metano. El objetivo del presente texto es analizar el programa mencionado; su funcionamiento; la estructura institucional que lo enmarca; su relación con la calidad del agua, recurso vulnerable y fuertemente contaminado; y evaluar la viabilidad económica de la inversión de los poricultores en el sistema de biodigestión (BDg) y en la maquinaria para generar energía eléctrica (EE).

La información que sirve de base para el análisis financiero del programa de biodigestores se obtuvo de los trabajos de campo realizados en marzo de 2013, octubre de 2015 y enero de 2017. En esos periodos se encuestó a quince poricultores; se visitaron seis granjas pequeñas gestionadas por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA); se obtuvo información documental del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) y de la SEDUMA; se entrevistó a funcionarios del FIRCO, la SEDUMA, los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y a empresas privadas relacionadas con el programa de biodigestores.

LA ESTRATEGIA INTERNACIONAL DE CAPTURA DE METANO

Para combatir los efectos del desarrollo económico en el clima, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial constituyeron, en 1988, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En 1992, México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) que entró en vigor en 1994 y se iniciaron reuniones de alto nivel —Conferencia de las Partes (COP)— para analizar el proceso de cambio climático (CC), tomar acuerdos al respecto y darles seguimiento.

En la COP 3 en Kioto, Japón (1997), se adoptó el Protocolo de Kioto (PK) que entró en vigor en 2005 y en la COP 7 de Marrakesh, Marruecos (2001), los países mencionado en su anexo B³ se comprometieron a reducir sus emisiones 5.2% en el periodo 2008-2012, en relación con los volúmenes emitidos en 1990, compromiso que no se cumplió.

Para facilitar el cumplimiento, el PK creó tres mecanismos de mercado cuya mercancía fueron los GEI: el comercio de emisiones, la implementación conjunta y el mecanismo de desarrollo limpio (MDL). En el MDL, los países de su anexo 1 (prácticamente los mismos del anexo B del Protocolo de Kyoto) financiaban proyectos de mitigación en los países en desarrollo y recibían a cambio certificados de reducción de emisiones (CER, por sus siglas en inglés) que aplicaban al cumplimiento de sus propios compromisos (IPCC 2011). Las naciones del anexo 1 que aparecen en primer término reducían el costo de sus obligaciones y aportando capital y tecnología ayudaban a aquellas en desarrollo a cumplir sus compromisos.

Entre las catorce categorías autorizadas para el desarrollo de proyectos MDL estaban las de disposición y manejo de desechos, y agricultura. Un proyecto que participara en el MDL debía cumplir con las condiciones de adicionalidad, de determinación de la línea base y contribuir al desarrollo sostenible del país, siguiendo lo establecido en el Artículo 12 del PK (Naciones Unidas 1998).

Con la intención de frenar el peligro que significa el CC, en la reunión de la COP 23 de 2016 se firmó el Acuerdo de París que ratificó 55 países y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016 (Naciones Unidas 2017).⁴

El Acuerdo de París contiene medidas “aspiracionales” de mediano plazo y de carácter voluntario. Entre ellas, el compromiso, no vinculante, de evitar “en lo posible” que las temperaturas medias mundiales aumenten más de dos grados respecto a los niveles anteriores a la Revolución Industrial y hacer un esfuerzo por limitar el incremento a 1.5°C.

De los doscientos países miembros de la CMNUCC, 186 presentaron medidas voluntarias para reducir (o no aumentar al ritmo actual) las emisiones de GEI en un horizonte de 2025 a 2030. A diferencia de lo establecido en el PK, en este esfuerzo se supone que colaboran, con excepción de los países más pobres, países desarrollados y en desarrollo. Se eximió a China e India de reducir sus emisiones. Asimismo, se creó un Fondo Verde de \$100 000 millones de dólares estadounidenses (USD) anuales a partir de 2020 para que los países más pobres puedan enfrentar los problemas inmediatos del CC e iniciar su transición energética. Quedaron excluidas las emisiones causadas por la aviación y el transporte marítimo por la dificultad de atribuirlos a un país en concreto, no obstante que suponen entre 3% y 5% de las emisiones mundiales de GEI (Naciones Unidas 2017).

³ Treinta países desarrollados, ocho en transición y la Unión Europea.

⁴ La COP 23 de noviembre de 2017 en Bonn, Alemania, dejó prácticamente igual el Acuerdo de París.

EL MARCO INSTITUCIONAL DEL PROGRAMA DE BIODIGESTORES

La autoridad nacional designada para tramitar un proyecto MDL fue el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero, instaurado en 2004. En 2005, se creó la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), encargada de formular las políticas públicas y las estrategias transversales de mitigación y adaptación al CC (SEMARNAT 2014). Las empresas privadas, principalmente, promovían los proyectos MDL y las entidades operacionales se encargaban de valorarlos y emitir los CER. En 2012, la Ley General de Cambio Climático (LGCC) (DOF 2012), estableció que la política de mitigación debería promover programas para la reducción de emisiones por sectores y actividades, tomando como referencia los escenarios de línea base (Artículo 31). Entre los objetivos de la LGCC están: a) incentivar el uso de fuentes renovables de energía; b) poner en práctica tecnologías con bajas emisiones de GEI; c) aprovechar el potencial energético de los residuos, para lo cual reconoce programas e instrumentos de mitigación del PK (Artículo 33) y, d) generar, por lo menos, 35 % de la electricidad a partir de fuentes de energía limpias para 2024 (Artículo Segundo Transitorio). Para formar parte de la generación de EE con tecnologías bajas en emisiones, la LGCC propone establecer políticas e incentivos por parte de la Secretaría de Energía en coordinación con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Reguladora de Energía (Artículo 35).

En 2005, México ingresó a la Iniciativa Metano a Mercados⁵ (M2M) cuyos objetivos eran impulsar el crecimiento económico, promover la seguridad energética, reducir las emisiones de GEI, mejorar la calidad del aire y contribuir al combate del CC. La Iniciativa, presidida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) tenía cuatro subcomités: Petróleo y Gas, Minas, Rellenos Sanitarios y Residuos Agropecuarios.

En 2006, la SEMARNAT firmó el Acuerdo de Cooperación SEMARNAT-USAID-USEPA, para desarrollar proyectos de captura y uso productivo del CH₄; participaron la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), el FIRCO, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y la empresa AgCert (SEMARNAT 2007, 4).

Actualmente, la Unidad Responsable del Componente Bioenergía y Sustentabilidad del Programa de Fomento a la Agricultura 2015 es la Dirección General de Fibras Naturales y Biocombustibles de la SAGARPA y las Instancias Ejecutoras son el FIRCO, los FIRA y la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero.

El proyecto Construcción de Biodigestores e Implantación de Sistemas de Energía Renovable y de Eficiencia Energética fue apoyado por el FIRCO en 2010 (FIRCO 2010, 2).

⁵ Iniciativa Global de CH₄ a partir de 2010.

ANTECEDENTES DEL PROGRAMA DE BIODIGESTIÓN

El primer proyecto de BD en granjas porcinas pequeñas y medianas que se financió en el marco de la Iniciativa M2M fue el programa piloto Manejo Integral de Excretas y Aprovechamiento de Metano en la Cuenca Lerma-Chapala. Se instalaron tres BD de tipo anaeróbico con una geomembrana que cubría la laguna de oxidación, una laguna adicional impermeabilizada para el tratamiento del efluente y un sistema de medición y quemado de biogás y de filtrado para retirar agua y azufre (SEMARNAT 2007, 6).

El INIFAP estimó, con base en parámetros teóricos, la captura de CH_4 en términos de CO_2e^6 e hizo el análisis químico del afluente, el efluente y el biogás.

En esta etapa se construyeron dos BD en granjas grandes (Carroll y Santa Mónica) y se preveía instalar tres BD de tipo bolsa⁷ en granjas muy pequeñas. No se consideró generar EE porque los proyectos sólo financiaban la quema de CH_4 (SEMARNAT 2007, 12).

En 2006, el FIRCO financió un proyecto piloto de aprovechamiento de biogás en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, que consistió en la instalación de nueve motogeneradores en unidades donde ya había BD funcionando. Ese mismo año, mediante convenio con la empresa AgCert se instalaron BD en granjas de Sonora y del centro del país, principalmente en Jalisco.

AgCert cotizó estos proyectos en la Bolsa de Londres y obtuvo el contrato para invertir en México. En el esquema inicial, AgCert asumía la inversión total y se quedaba con los bonos de carbono durante cinco años; después, los bonos pertenecerían al poricultor. Con el paso del tiempo fue evidente que este mercado no funcionaba y, ni AgCert ni los poricultores, pudieron hacer efectivos los bonos de carbono.

En 2008, el FIRCO impulsó el Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable para reducir las emisiones de GEI en el sector agrícola, propiciar el ahorro de energía, bajar costos de producción y, favorecer la rentabilidad de los agronegocios mediante la adopción de energías renovables y prácticas de eficiencia energética. El proyecto se financió, parcialmente, con un préstamo del Banco Mundial (BM) de 50 millones de USD y con un donativo de 10.5 millones USD del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, por sus siglas en inglés), en un periodo operativo del proyecto de 2009 a 2016 (FIRCO 2008).

En 2010, la SEMARNAT firmó un compromiso con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para financiar proyectos de captura de CH_4 y desarrollar proyectos con el FIRCO para la cogeneración de EE en granjas porcícolas (SEMARNAT, 2011). Estos apoyos se orientaron, desde su inicio, a granjas porcícolas y lecheras tecnificadas de gran escala, donde las enormes cantidades de estiércoles

⁶ Una granja de 520 cabezas produciría 93 t de $\text{CO}_2\text{e}/\text{año}$; de 120 cabezas, 38 t $\text{CO}_2\text{e}/\text{año}$; de 190 cabezas, 54 t $\text{CO}_2\text{e}/\text{año}$ (SEMARNAT 2007, 7).

⁷ Conocidos como biodigestores plásticos de flujo continuo, diseño CIPAV de Cali, Colombia.

garantizaban el funcionamiento del sistema. La premisa era que el influente del BD tenía las características físico-químicas ideales para la generación de biogás y que el aprovechamiento de las excretas sólo era posible en granjas con niveles de tecnificación e inventarios elevados. El FIRCO reconocía que había pocas granjas de este tipo, pero los impactos en la reducción de emisiones de CH₄ podían ser considerables.

Las granjas elegibles para incorporar sistemas de BDg debían cumplir con un conjunto de requisitos (tabla 1) y para instalar un motogenerador debían tener un consumo de cuando menos 10 000 kilovatios hora (kWh) mensuales de EE (FIRCO 2010, 8).

Tabla 1. Requisitos para la instalación de biodigestores

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Intensivas, confinadas, con sistema de manejo que permitiera producir biogás. 2. No menores a 200 vientres (aproximadamente 2 000 cabezas). 3. Con espacio suficiente para instalar el biodigestor. 4. Con una laguna de oxidación para poder establecer la línea base. 5. De gran escala o parte de un conjunto de unidades que permitan minimizar costos de inversión, transacción (registro y supervisión de los CER), y facilitar el monitoreo. |
|--|

Cuando la instalación de un BD se realizaba de manera independiente, el FIRCO exigía los mismos requisitos y agregaba que su instalación no afectara las condiciones de seguridad de la granja. Asimismo, estableció un conjunto de especificaciones técnicas mínimas para la instalación de BD y motogeneradores.

El proyecto de BD en granjas porcinas derivado del MDL no ha sido evaluado de manera integral. La referencia más completa se encuentra en un diagnóstico (en línea) elaborado por el FIRCO con base en una muestra de 479 BD instalados en diez estados, entre ellos Sonora, Jalisco, Guanajuato y Yucatán (SAGARPA y FIRCO 2011, 2).

El diagnóstico (2011, 10-12) informa que en 2010 había 721 BD en granjas porcinas, de las cuales 563 tenían un *Project Design Document*⁸ (PDD): 528 instalados por AgCert, 31 por Ecosecurity, Enviroquest International y Cantor CO₂ ingresaron un proyecto cada una, y dos el Grupo Porcícola Mexicano de Yucatán (datos hasta 2009 sin mencionar el sector).

Este diagnóstico se basó en una visita a 345 BD existentes, 266 se instalaron bajo el esquema MDL, el FIRCO gestionó 73 y la iniciativa M2M, cuatro. 82 % estaba operando, 94 % eran anaeróbicos con una geomembrana que cubría una

⁸ El *Project Design Document* era uno de los tres documentos indispensables para validar y registrar un proyecto en el MDL.

enorme laguna de oxidación, 4 % modulares y 1 % biobolsas y de ferrocemento (SAGARPA y FIRCO 2011, i; SAGARPA y FIRCO 2011, 19). Había registrados 178 proyectos ante la Junta Ejecutiva de la CICC; 142 tenían un PDD de reducción de CH₄ en el sector agropecuario y 88 en granjas porcinas que en total contribuirían a disminuir más de diez millones de toneladas de CO₂e (SAGARPA y FIRCO 2011, 10).

Ninguno de los sistemas documentados en el diagnóstico se financió en su totalidad con recursos propios de los productores. En las granjas apoyadas por el MDL, la empresa desarrolladora cubrió todos los costos como una donación a los productores. En las unidades apoyadas por el FIRCO, los productores aportaron aproximadamente 50 % de la inversión, financiada por lo general, con créditos de los FIRA. El diagnóstico del FIRCO de 2011 encontró que los BD estaban sobredimensionados, tenían fallas en los sistemas de agitación y en el quemador, el mantenimiento no se realizaba de manera regular, y los propietarios no estaban suficientemente familiarizados con el funcionamiento del sistema.⁹

Los porcicultores se incorporaron al programa de BD estimulados por la posibilidad de vender los bonos de carbono y generar EE. Pero, sobre todo, necesitaban bajar la presión de la CONAGUA para que cumplieran con la norma sobre descarga de aguas residuales.

LOS BIODIGESTORES EN YUCATÁN

Yucatán fue un lugar idóneo para desarrollar un programa de BD porque varias granjas grandes habían instalado sistemas de tratamiento (ST) de aguas residuales (AR) y, por tanto, contaban con la línea base para acceder al esquema de financiamiento del MDL. Sin embargo, la gran mayoría de las unidades grandes, medianas, pequeñas y de traspatio rural y periurbano, no trataban las AR.

Los ST de AR en granjas porcinas se desarrollaron a partir de 1993 con un programa¹⁰ que proponía la combinación de varias operaciones unitarias que incluían cárcamos de recepción, separadores de sólidos y una o más lagunas de oxidación. En los veinte años que transcurrieron entre este programa y los proyectos MDL, varias granjas instalaron ST que sirvieron para establecer la línea base.

En Yucatán dos problemas particulares complicaron la instalación del ST de AR: el tipo de suelo que eleva considerablemente la inversión y las características del acuífero. La península de Yucatán es una plataforma formada por rocas calcáreas y evaporitas que constituyen una superficie cárstica con escasa formación de suelos y ausencia de corrientes superficiales; casi toda el agua de lluvia se infiltra dada la

⁹ Adicionalmente, la encuesta encontró que se desconoce la cantidad de agua que entra al BD; que el BD es incapaz de retener toda el agua que le llega; se forman cristales en las bombas difíciles de eliminar y la producción de lodos, muy alta, no cuenta con un plan de manejo, entre otros problemas.

¹⁰ Programa impulsado por el entonces Consejo Mexicano de Porcicultura con el apoyo de la CONAGUA y del Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM (ver Taiganides *et al.*).

elevada permeabilidad de las calizas (Alcocer *et al.* 1999, 42). 80 % de los suelos de Yucatán son leptosoles someros, de escasa profundidad, mínima cantidad de tierra fina y gran cantidad de piedras y afloramientos de roca (Bautista 2010, 14). El acuífero es costero y presenta elevada permeabilidad, un gradiente hidráulico muy bajo y el nivel freático se encuentra ligeramente por arriba del marino, lo cual implica una velocidad de flujo reducida (Alcocer *et al.* 1999, 43).

La elevada contaminación del acuífero motivó que la CONAGUA, la SEDUMA y grupos de la sociedad presionaran a los porcicultores para que trataran las AR de sus granjas. Pero hasta que surgió el estímulo de la venta de bonos de carbono se impulsó el programa de tratamiento con base en BD cuya finalidad inmediata fue quemar el CH₄ y participar en el mercado de carbono.

En la porcicultura de Yucatán conviven enormes granjas altamente tecnificadas, granjas medianas y numerosas unidades pequeñas, muchas de ellas de traspatio en zonas urbanas y periurbanas. Las granjas grandes que participan en el programa de BD han sido apoyadas por el FIRCO y financiadas por los FIRA, las medianas y pequeñas, por la SEDUMA. El Instituto Internacional de Recursos Renovables y el Programa Biobolsa asesoran y financian unidades de traspatio muy pequeñas.

La empresa AgCert instaló tres BD; el acuerdo fue que en el segundo año de operación del BD, AgCert transferiría al productor 10 % del monto de CER vendido, cantidad que se incrementaría hasta llegar a 30 %. A partir de 2011 el MDL dejó de pagar¹¹ y AgCert abandonó el programa de Yucatán; los porcicultores nunca recibieron los bonos de carbono.

La empresa Kent&Sorensen (K&S) ha instalado la mayor parte de los BD en Yucatán, tanto en granjas grandes de la Asociación Ganadera Local de Porcicultores de Mérida, como en granjas pequeñas y medianas bajo la gestión de la SEDUMA. Como excepción, la empresa Poch Chile instaló los BD del Grupo Porcícola Mexicano (Kekén) y en forma independiente, algunos porcicultores han instalado BD de cúpula de concreto con tecnología cubana.¹²

EL PROGRAMA DEL FIRCO

El proyecto de BD de Yucatán se inició en 2008 en el marco del Programa de Energías Renovables del FIRCO y se mantuvo, con algunos recortes, en la programación del Banco Mundial de 2015. Los primeros 37 BD (10 de la empresa Kekén) y dos motogeneradores se instalaron en ese año.

El tamaño de un BD varía en función de la dimensión de la granja, las condiciones del terreno y el número de animales. Inicialmente, tanto K&S como

¹¹ El protocolo California Climate Action. Livestock Project seguía pagando, pero los productores que se sumaron al MLD ya no eran aceptados en ese protocolo.

¹² Para información técnica sobre biodigestores se puede consultar la tesis de doctorado de Liliana Pampillón "Los biodigestores en la gandería de México: aprovechamiento de los lodos", CINVESTAV, IPN, noviembre 2014.

el FIRCO establecieron como requisito que las granjas tuvieran cuando menos quinientos vientres (alrededor de cinco mil cerdos), posteriormente redujeron la cifra a trescientos. En cualquier caso, el esquema de financiamiento de un BD de cuatro mil metros cúbicos de capacidad¹³ es el mismo para todas las granjas y consiste en un apoyo a fondo perdido del FIRCO de un millón de pesos; el productor aporta aproximadamente 1.5 millones de pesos, la mayoría de las veces con créditos de los FIRA.

La información proporcionada por el FIRCO, correspondiente a los proyectos que ha financiado esta institución en el área de Yucatán, muestra que de 2008 a 2016 se habían instalado 64 BD (treinta de la empresa Kekén) con un apoyo del FIRCO de 60.9 millones de pesos y una aportación de los porcicultores de 103.48 millones de pesos. El FIRCO apoyó la adquisición de 43 motogeneradores con 11.1 millones de pesos; los porcicultores invirtieron en este equipo 15 millones de pesos.

La transformación de CH₄ en EE requiere un equipo adicional que también fue financiado por el FIRCO con préstamos del BM (tabla 2). En octubre de 2015, la Asociación Ganadera Local de Porcicultores de Mérida informó que se había instalado un total de 123 BD.

Tablas 2a, 2b y 2c. Resumen de la información de Yucatán proporcionada por el FIRCO (cifras en MXN corrientes)

Año	BD	Monto FIRCO	Monto beneficiario	Inversión total
2008	37	\$ 36 421 000.00	\$ 63 637 402.01	\$ 100 058 402.01
2009	5	\$ 4 444 915.00	\$ 6 792 059.00	\$ 11 236 974.00
2010	5	\$ 4 119 600.00	\$ 5 888 259.00	\$ 10 007 859.00
2011	9	\$ 8 744 028.00	\$ 14 094 051.12	\$ 22 838 079.12
2012	1	\$ 1 000 000.00	\$ 1 623 442.03	\$ 2 623 442.03
2013	0	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00
2014	4	\$ 4 000 000.00	\$ 6 454 906.29	\$ 10 454 906.29
2015	0	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00
2016	3	\$ 2 193 279.00	\$ 4 994 721.00	\$ 7 188 000.00
Total	64	\$ 60 922 822.00	\$ 103 484 840.45	\$ 164 407 662.45
Inversión unitaria del biodigestor				\$ 2 568 869.73

¹³ Con dimensiones aproximadas de 60 x 40 x 5 metros (m) de profundidad de los cuales sólo se excavan 2m y 3m se levantan sobre la superficie, tipo albarrada. Los BD de Kekén son mayores: 120 m x 120 m.

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN. EL PROGRAMA DE BIODIGESTORES EN YUCATÁN, MÉXICO

Año	Motogeneradores	Monto FIRCO	Monto beneficiario	Inversión total
2008	2	\$ 500 000.00	\$ 652 407.10	\$ 1 152 407.10
2009	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2010	30	\$ 7 500 000.00	\$ 9 900 000.00	\$ 17 400 000.00
2011	9	\$ 2 104 550.00	\$ 2 778 006.00	\$ 4 882 556.00
2012	1	\$ 500 000.00	\$ 1 214 181.35	\$ 1 714 181.35
2013	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2014	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2015	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2016	1	\$ 500 000.00	\$ 533 040.00	\$ 1 033 040.00
Total	43	\$ 11 104 550.00	\$ 15 077 634.45	\$ 26 182 184.45
Inversión unitaria del motogenerador				\$ 608 888.01

Año	O. A.	Monto FIRCO	Monto beneficiario	Inversión total
2008	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2009	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2010	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2011	1	\$ 150 000.00	\$ 335 836.44	\$ 485 836.44
2012	17	\$ 3 184 770.00	\$ 4 356 376.54	\$ 7 541 146.54
2013	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2014	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2015	0	\$0.00	\$0.00	\$0.00
2016	1	\$ 500 000.00	\$ 508 352.00	\$ 1 008 352.00
Total	19	\$ 3 834 770.00	\$ 5 200 564.98	\$ 9 035 334.98
Inversión unitaria en obras accesorias				\$ 475 543.95

Fuente: FIRCO.

EL PROGRAMA DE BIODIGESTORES DE LA SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y MEDIO AMBIENTE

En Yucatán, la producción de cerdos en pequeña escala es numerosa e importante. Esto se debe, en buena parte, a que los hábitos alimenticios locales privilegian la carne de cerdo; pero también influyó que en la década de los ochenta se promovió la cría de cerdos entre los pequeños productores para resarcirlos de la caída de los precios del henequén,¹⁴ situación que dejó sin empleo y sin ingresos a un sector importante de la población rural (Pérez 1986, 163).

El objetivo del programa de la SEDUMA es reducir los múltiples problemas ambientales que ocasiona a la población aledaña la pequeña y mediana porcicultura localizada en zonas urbanas y periurbanas. La SEDUMA estima que 80 % de las granjas en Yucatán son pequeñas y que en conjunto tienen un inventario aproximado de setecientos mil cerdos. Sólo en el municipio de Mérida hay 479 granjas de pequeña a mediana escala con inventarios entre cien y mil cerdos.

El primer programa de la SEDUMA inició en 2008 con la instalación de 150 BD. Además del beneficio ambiental del confinamiento y tratamiento de residuales, se obligaba al poricultor a registrar su pozo ante la CONAGUA y participar en esquemas de riego agrícola.

La SEDUMA tenía previsto desarrollar el programa en tres etapas. En la primera se instalaron 50 BD de tres tamaños diferentes con un financiamiento de 18 millones de pesos otorgado por el BID y el gobierno del estado. Sólo participaron granjas con un mínimo de cien cerdos cuya pendiente se orientara hacia el primer registro y el BD. En la mayor parte, en estas primeras granjas había una población de entre cuatrocientos y quinientos cerdos, pero también se incluyeron siete granjas no tan pequeñas de entre mil y tres mil animales. Éstas recibieron apoyo del BID y del FIRCO por partes iguales.

La SEDUMA estimó que la descarga de las primeras cincuenta granjas sería de 1 432 metros cúbicos al día (m³/día), aproximadamente, y que las excretas de unos 53 890 cerdos recibirían tratamiento.¹⁵ El costo de los BD variaba de acuerdo con su tamaño (tabla 3):

Tabla 3. Costo y capacidad de los biodigestores de la SEDUMA

Costo en pesos	Capacidad
\$ 328 000	100 m ³
\$ 653 000	500 m ³
\$ 821 000	1 000 m ³

Fuente: información directa de la SEDUMA.

¹⁴ Programa de Diversificación Henequenera.

¹⁵ Información personal de funcionarios de la SEDUMA.

La porcicultura en Yucatán ha crecido en las grandes empresas que ahora exportan carne de cerdo y también en el sector apoyado por la SEDUMA, de tal manera que la segunda etapa que finalizó en 2016,¹⁶ con la entrega de cien BD de las dos primeras etapas, incluyó la instalación de BD en granjas grandes con una erogación de cincuenta millones de pesos financiada con fondos federales y estatales por partes iguales. Una tercera etapa incluiría otras cincuenta granjas.

La infraestructura de estos sistemas de tratamiento es estándar incluye un cárcamo o fosa primaria de 3 x 3 x 1.5-2 m de fondo, con una capacidad aproximada de 13 m³, canaletas bien diseñadas, no necesariamente revestidas, y dos bombas de lodos, una para introducir el AR de la fosa al BD y otra del BD al terreno de riego o al humedal. En estas granjas como en otras con BD, no se conoce el tiempo de retención hidráulica. La SEDUMA financiará un monitoreo que someterá a concurso para evaluar la eficiencia del sistema en quince granjas, se medirá la producción de CH₄ y se analizará la calidad del AR.

ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS

Disminución teórica de la emisión de gases de efecto invernadero

De acuerdo con Steinfeld *et al.* (2009, 137), la disminución teórica de CH₄ con sistemas de BDg en granjas porcinas es de 75%; por otra parte, el factor de emisión de este GEI en el manejo de excretas porcinas es de 0.6944 kg/cabeza/año (MCE² e INECC 2013, 151-152). Esto significa que el programa de BD del FIRCO en Yucatán ha colaborado en la disminución de 303.3 t/CH₄/año de un total de 404.4 t/CH₄/año y se siguen emitiendo 101.1 t/CH₄/año. Con el programa de la SEDUMA en granjas pequeñas y medianas, la emisión de CH₄ ha disminuido 28.07 t/CH₄ de un total de 37.42 t/CH₄/año y se siguen emitiendo 9.36 t/CH₄/año.

Calidad del agua y cumplimiento normativo

A los problemas técnicos de manejo del BD ya mencionados, se suma que el efluente no cumple con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001) para las descargas de AR¹⁷ que establece límites máximos permisibles (LMP) a veinte parámetros contaminantes en función del lugar de la descarga y del uso posterior del agua.

Los tratamientos secundarios, entre ellos la biodigestión, no son suficientes para cumplir con la NOM-001 diseñada con base en descargas altamente diluidas y con menor carga orgánica (Pérez 2006, 108-109). Tampoco son eficientes para tratar los sólidos volátiles totales y los sólidos fijos (Trejo *et al.* 2014, 323).

¹⁶ La página electrónica de la SEDUMA del 18 de mayo de 2016 se refiere al proceso de “entrega-recepción” de BD a poricultores en el de Construcción de sistemas de tratamiento para desechos sólidos y líquidos en pequeñas y medianas granjas porcícolas (SEDUMA, 2016).

¹⁷ NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los LMP de contaminantes en las descargas de aguas residuales a terrenos y bienes de la nación.

Para resolver el problema de contaminación del efluente del BD, los porcicultores han sugerido que el FIRCO financie un tratamiento posterior cuyo costo, en opinión de porcicultores y de algunos especialistas, resulta muy elevado.

La CONAGUA admite que el programa de BD no cumple con la normatividad sobre descarga de AR, ya que no fue establecido para tal fin pero, para facilitar el cumplimiento, ha propuesto: 1) hacer un descuento a los porcicultores en el pago inicial de derechos si presentan un informe con los análisis de AR. Este pago puede variar entre siete y diez mil pesos, simplemente porque se cumple con una parte de la normatividad. Cuando no se entrega el informe de calidad del AR, el pago de derechos puede ascender a cuarenta mil pesos y; 2) “ajustar” la NOM-001 cuando el AR del BD se usa en riego agrícola y solicitar que se analicen sólo cinco parámetros: potencial de hidrógeno (pH), grasa y aceites, materia flotante, huevos de helminto y coliformes fecales. El pago de derechos, establecido en la Ley Federal de Derechos, se hace sobre: a) volumen de agua residual descargada ($\$4.67 \text{ MXN m}^3/\text{AR}$ en tipo de cuerpo receptor A;¹⁸ b) demanda química de oxígeno (DQO) cuyo LMP es 1000 miligramos por litro de AR (mg/lAR) y, c) sólidos totales suspendidos (SST) que tienen un LMP de 3000 mg/lAR. En función de la magnitud de estos dos parámetros es posible reducir el monto del pago. Con el sistema de BDg en operación el nitrógeno (N), el fósforo (P), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la DQO y los SST se rebasan, pero como el agua no es un factor limitante en esta región, la recomendación de la autoridad es que el efluente se diluya con agua limpia, siempre y cuando la descarga final sea para fertirrigación y; 3) en granjas grandes que no tienen espacio para instalar un BD, perforar un pozo de inyección a unos noventa metros en función del nivel de la zona salobre. La perforación tiene un costo entre $\$240000$ y $\$260000$ MXN, razón por la cual nadie tiene ese pozo.

En general, todos los BD se saturan y forman encharcamientos y el problema es más grave en granjas que no tienen terreno para regar pastos. Se ha propuesto construir lagunas de oxidación o instalar humedales, alternativas que en granjas grandes tienen un elevado costo.

Algunas investigaciones (Belmar *et al.* 2007a, 10) han encontrado que el lirio de agua, la lechuga de agua y la lenteja de agua redujeron sustancialmente la DQO. De acuerdo con Flores *et al.* (2012, 1), 32 especies de plantas tienen potencial para la limpieza de aguas contaminadas. El establecimiento de humedales en una granja de engorda (Belmar *et al.* 2007b: 4), encontró eficiencias altas de remoción de doce parámetros, entre ellos la DBO, grasas y aceites, los SST, N, P y coliformes fecales. El experimento realizado demuestra las bondades del sistema de humedales,¹⁹ sin embargo, no ofrece información de costos ni de las dimensiones de la granja que permite su uso eficiente.

¹⁸ Información obtenida de la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2016.

¹⁹ Técnica de uso frecuente en EUA y otros países. Ver Hunt *et al.* (2000).

Sólo uno de los porcicultores entrevistados ha establecido humedales. Su granja es mediana, las excretas se recolectan con pala y la cantidad que entra al BD y después va al humedal es reducida. En este caso, el sistema ha funcionado.

El efluente final sigue siendo un problema, en especial, cuando no hay terreno para cultivar pastos. En teoría, todos los lodos se quedan en el BD con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de treinta días. El problema es que las granjas en Yucatán siguen creciendo, el TRH aumenta y colapsa el funcionamiento.

Los lodos del BD son el otro gran problema. El plan de manejo inicial proponía no esperar que los BD se llenaran, sino sacarlos cada año, dejar que se degradaran y usarlos como abono. Sin embargo, los porcicultores no cuentan con recomendaciones técnicas para su empleo en la agricultura. Algunos los aplicaban directamente a los pastos y cultivos, a pesar de su acidez, otros los diluían en cantidad de 4-5 litros por segundo (l/seg) para los 15 l/seg del efluente del BD.

Hasta 2015, no había un muestreo sistemático del residual en todas las granjas porcinas que cuentan con un BD.²⁰

Generación de energía eléctrica

De acuerdo con la Agencia de Recursos Renovables de Alemania (FNR por sus siglas en alemán), el biogás generado por las excretas líquidas de cerdo contiene 65 % de CH₄ y un metro cúbico de este gas tiene un contenido energético de 9.97 kWh (FNR 2009, 8-9). Por otra parte, Martínez (2015, 106) señala que la energía contenida en el biogás es de 5.56 kWh/m³. Con esta información y los datos que el FIRCO proporcionó sobre el biogás producido en algunas granjas, se obtuvo una aproximación del CH₄ generado al año y su contenido energético teórico:

Tabla 4. Biogás, metano y su contenido energético en granjas porcícolas en Yucatán

Núm. de granja	Año*	Núm. de animales*	Biogás generado (m ³ /año)*	Metano generado (m ³ /año)**	Contenido energético en la cantidad de metano que producen (kWh/año)**	Contenido energético en la cantidad de metano que producen (kWh/año)***
1	2010	5 250	396 353.5	257 629.8	2 568 568.86	2 203 725.46
2	2010	6 783	370 365.5	240 737.6	2 400 153.62	2 059 232.18
3	2010	9 000	355 692.5	231 200.1	2 305 065.25	1 977 650.30
4	n. d.	7 500	310 104.0	201 567.6	2 009 628.97	1 724 178.24

²⁰ Al inicio del programa, el Instituto de Ingeniería de la UNAM hizo un muestreo parcial cuyos resultados no fueron entregados a los porcicultores.

Núm. de granja	Año*	Núm. de animales*	Biogás generado (m ³ /año)*	Metano generado (m ³ /año)**	Contenido energético en la cantidad de metano que producen (kWh/año)**	Contenido energético en la cantidad de metano que producen (kWh/año)***
5	2011	6 249	223 526.0	145 291.9	1 448 560.24	1 242 804.56
6	2011	6 235	219 182.5	142 468.6	1 420 412.19	1 218 654.70
7	2011	6 089	217 795.5	141 567.1	1 411 423.74	1 210 942.98
8	2011	6 219	213 123.5	138 530.3	1 381 146.84	1 184 966.66
9	2011	6 259	210 605.0	136 893.3	1 364 825.70	1 170 963.80
10	2011	6 249	205 677.5	133 690.4	1 332 893.04	1 143 566.90
11	2011	5 619	200 823.0	130 535.0	1 301 433.45	1 116 575.88
12	2011	6 203	95 666.5	62 183.2	619 966.75	531 905.74
13	2011	8 125	42 559.0	27 663.4	275 803.60	236 628.04
Total		85 780	3 061 474.0	1 989 958.1	19 839 882.26	17 021 795.44
Pro-medio		6 598	235 498.0	153 073.7	1 526 144.79	1 309 368.88

*Datos otorgados por el FIRCO.

**De acuerdo con datos de la FNR (2009, 8-9).

***De acuerdo con datos de Martínez (2015, 106).

El FIRCO proporcionó datos de trece granjas de engorda con 6 598 animales en promedio, que generan 235 498 m³ de biogás/año en promedio cada una; esto equivale a 58.4 m³ de biogás/UPA²¹/año. Con esta información, la cantidad de CH₄ en el biogás es de 153 073.7 m³ en promedio por granja (FNR 2009, 8-9) y, de acuerdo con FNR y Martínez, el contenido energético teórico del CH₄ producido en estas granjas es muy parecido. En promedio, cada granja tendría que estar produciendo entre 1 309 368.88 y 1 526 144.79 kWh/año, o bien, entre 317.50 y 370.06 kWh/UPA/año.

Sin embargo, de acuerdo con datos del FIRCO, la cantidad de EE producida por algunas granjas que tienen BD es la siguiente:

²¹ Unidad de población animal (UPA) que equivale a 62.5 kilogramos (kg) en granjas de engorda.

Tabla 5. Energía eléctrica producida en granjas porcícolas con BD e interconexión a la red de la CFE

Núm. de granjas	Año	Núm. de animales	Potencia del motogenerador	Horas al día que trabaja el motogenerador	Cantidad de EE producida (kWh/año)
1	2010	5 250	55	5.5	48 213.0
1	2011	8 000	55	4.0	34 632.0
1 (caso hipotético)	2011	8 000	55	10.6	92 660.9
2	2011	n. d.	n. d.	14.3	75 234.0
3	2011	6 783	n. d.	10.4	92 793.6
4	2011	5 619	50	9.7	17 340.0

n. d.: no disponible.

Fuente: FIRCO.

Como se observa, la cantidad de EE que realmente están produciendo las granjas porcícolas, comparada con la que teóricamente podrían generar, inclusive tomando en cuenta los datos más sesgados (granjas 12 y 13 de la tabla 4), es abismalmente diferente. Una de las empresas entrevistadas que instala BD en Yucatán señaló que para lograr transformar todo el CH₄ que producen las granjas porcícolas, los productores tendrían que colocar alrededor de cinco motogeneradores como los que actualmente tienen o alguno con mayor capacidad.

Con la información del FIRCO, cuando los motogeneradores trabajan en promedio 12.45 hr/día, producen 6 000 kWh/día (219 000 kWh/año). Dado que sólo necesitan aproximadamente 91 184 kWh/año, podrían portear²² la EE sobrante de 128 000 kWh/año, es decir, utilizarla en otro sitio. Sin embargo, el porteo tiene un costo para los porcicultores y hasta el momento no es una práctica que se esté llevando a cabo. Es importante mencionar que el porteo y su uso en otros puntos sería la única opción para poder comercializar la EE restante. Las granjas apoyadas por el FIRCO no generan el suficiente CH₄ para poder vender a la Red Nacional, pues necesitarían tener una capacidad mínima de 0.5 megavattios (MW), de acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) (DOF 2014).

A pesar de la capacidad energética de los BD y del interés de los porcicultores en reducir sus costos mediante el ahorro en el pago de EE, puesto que 70 % de

²² El porteo de electricidad se refiere a la trasmisión de energía eléctrica generada por un particular autorizado por la CFE, a otro particular.

los que tienen un BD también ha instalado un motogenerador de aproximadamente sesenta caballos de fuerza, conciliar la transformación de EE que genera la granja con el servicio que presta la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es muy complicado.

Según los lineamientos establecidos en la LIE, su reglamento, así como las características de infraestructura requeridas por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), la interconexión con la CFE requiere firmar un contrato para obtener un medidor bidireccional y poder subir EE a la red. Esto permitiría que el excedente de energía que se produzca y no se consuma, se almacene en la red eléctrica. Se dispone de doce meses para utilizar esta energía o bien, existe la posibilidad de que se utilice en otro sitio.

El problema de sincronía ha sido tan gravoso que sólo tres porcicultores y dos unidades de Kekén²³ tenían este tipo de interconexión y son los únicos que están en posibilidad de saber cuánta energía están ahorrando.

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) no tiene delegación en Yucatán y, en opinión de los porcicultores, la CFE no ha mostrado mucho interés en colaborar:²⁴ tardó mucho tiempo en entregar el medidor a uno de los porcicultores, no le proporcionaba su especificación y la obtención de la sincronía llevó año y medio. El FIRCO apoya con el 50% del costo de interconexión, pero lo complicado de los trámites impide que más porcicultores se sumen a este beneficio. Las granjas que tienen sincronía están en el programa Empresa con Energía Renovable.

Análisis de rentabilidad

De 2008 a 2016, el programa del FIRCO en Yucatán ha financiado a varios porcicultores con un monto de \$75 862 142.00 MXN. Por su parte, los productores han invertido \$123 763 039.87, dando un total de inversión de \$199 625 181.87 MXN que financió la quema de CH₄ y, en algunos casos, la generación de EE.

Para realizar el análisis de rentabilidad de la inversión en el sistema de BDg y en la generación de EE se examinó la información que proporcionó el FIRCO de 69 de las 73 granjas²⁵ beneficiadas con el programa de apoyo a la instalación de BD, motogeneradores y obras accesorias,²⁶ de manera que se obtuvo el valor presente neto (VPN) de la inversión y su periodo de recuperación.

Se seleccionaron diecisiete unidades porcinas homogéneas que recibieron recursos para instalar las tres tecnologías (BD, motogenerador y obras accesorias),

²³ Kekén tiene programado sincronizar 21 equipos.

²⁴ En algún momento, el área de construcción de la CFE y el Instituto de Ingeniería de la UNAM hicieron una propuesta que nunca llegó a manos de los porcicultores.

²⁵ No se analizaron cuatro granjas (programa 2014) por falta de información sobre el tipo de granja y el número de animales.

²⁶ En 2015, el programa del FIRCO no otorgó recursos a ningún productor por falta de presupuesto.

con la finalidad de conocer la inversión total que se requiere para el funcionamiento de un BD y la transformación del biogás en EE. La inversión promedio total en cada una de las granjas fue de \$3757984.94 MXN, de los cuales el FIRCO aportó, en promedio, 38.2% y el productor 61.8%, aproximadamente.

Cada una de las granjas analizadas tiene una media de 5939 animales en inventario (con una desviación estándar de 31.48 cabezas) y la inversión total promedio por animal fue de \$632.78 MXN (con una desviación estándar de \$4.70 MXN).

Asimismo, se realizó el análisis por unidad de población animal (UPA) para poder trasladar la información de la inversión necesaria en una granja de engorda a los otros tipos de granja que se han apoyado. Si se considera que una UPA equivale a 62.5 kg en granjas de engorda (programa de cómputo PigMex), a los 5939 cerdos en engorda corresponden en promedio 3712 UPAs. Con lo anterior, se concluye que la inversión total fue de \$1012.43 MXN/UPA, de los cuales el beneficiario aportó \$625.20 MXN/UPA, mientras que el FIRCO contribuyó en promedio con \$387.23 MXN/UPA por granja (precios del 2008).

Los flujos anuales de efectivo del análisis de cada granja fueron resultado de:

1. Sumar el ahorro en el pago de derechos por descarga de AR. De acuerdo con datos de una empresa de gestión ambiental con sede en Yucatán, los parámetros promedio típicos del efluente de agua de granjas porcícolas en Yucatán que cuentan con BD son: DQO de 275 mg/l de AR y SST de 142 mg/l de AR. Asimismo, los parámetros promedio de granjas sin BD, pero con otro tratamiento son DQO de 529.38 mg/l AR y SST de 376.25 mg/l AR. Con estos datos, se estima una disminución de 43.4% en el pago de derechos por descarga de AR, considerando que la mayor parte de los productores con BD descarga a un tipo de cuerpo receptor A (riego), según la clasificación de la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

Tabla 6. Parámetros del efluente de granjas porcícolas en Yucatán con y sin BD

	Con biodigestor	Sin biodigestor
Grasas y aceites	13.3	17.21
Coliformes fecales	576	873
pH	7.38	7.87
Demanda química de oxígeno	275	529.38
Sólidos suspendidos totales	142	376.25

Fuente: información de la empresa de gestión ambiental.

2. Sumar el ahorro por generación de EE. Con el sistema de BDG, además del ahorro en el pago de derecho por descarga de AR, se produce biogás que al transformarse en EE disminuye e incluso elimina el pago por este concepto. De acuerdo con datos del FIRCO sobre cuatro granjas, el pago de EE ahorrado al invertir en el sistema de BDG depende directamente del número de hr/día que trabaja el motogenerador. Cuando trabaja entre 10.6 y 14.3 hr/día se ahorra 100 % del pago por electricidad y cuando el motogenerador trabaja únicamente entre 4 y 5.5 hr/día, el ahorro en el pago por electricidad está entre el 41 % y 48 %, aproximadamente.

Tabla 7. Energía eléctrica utilizada en instalaciones porcícolas en Yucatán y ahorro anual en su pago por uso de biodigestores (cifras en MXN)

Núm. de granjas	Núm. de animales	UPA (62.5 kg)	Cantidad de EE utilizada en las instalaciones (kWh/año)	Cantidad de EE utilizada en las instalaciones (kWh/UPA/año)	Precio (\$/kWh)	Ahorro anual en pago de EE (incluye IVA)	Porcentaje de ahorro
1	5 250	3 281	100 423.0	30.6	\$ 2.04	\$ 114 091.24	48 %
1	8 000	5 000	84 898.8	17.0	\$ 2.04	\$ 81 953.16	41 %
1 (caso hipotético)	8 000	5 000	92 660.9	18.5	\$ 2.04	\$ 219 272.75	100 %
2	n. d.	n. d.	75 234.0	n. d.	\$ 2.18	\$ 190 251.74	100 %
3	6 783	4 239	128 880.0	30.4	\$ 2.03	\$ 218 510.37	72 %
4	5 619	3 512	65 006.0	18.5	\$ 2.37	\$ 47 671.13	27 %

n. d.: no disponible.

Fuente: elaboración propia con datos del FIRCO.

Para conocer el ahorro por concepto de EE producida en cada granja con la generación de CH₄, se obtuvo el producto de las UPA en cada instalación, multiplicado por el promedio de la tarifa 2 que se aplica a los productores porcícolas (CFE 2017)²⁷ y por la cantidad de kWh/UPA requerida en las instalaciones, que según el FIRCO, es aproximadamente 23 kWh/UPA/año.

²⁷ Tarifa de baja tensión con tres precios: para cada uno de los primeros 50 kWh, para cada uno de los siguientes 50 y para cada kWh adicional a éstos. En promedio, las tarifas de 2009 a 2016 fueron \$ 2 066, \$ 2 265, \$ 2 445, \$ 2 587, \$ 2 610, \$ 2 681, \$ 2 436 y \$ 2 553, y su crecimiento anual fue de 3.2 %.

3. Restar los costos operativos anuales del BD, del motogenerador y de las obras accesorias. Se refiere a cambio de aceite y de bujías, filtros de aceite y de biogás, reparaciones varias, mantenimiento del sistema y mano de obra (precios de 2011). Haciendo estimaciones con datos de 2011 y 2012, el promedio fue de \$64656.31 MXN para un BD en una engorda de 5 250 animales; por cada UPA de 62.5 kg el costo de operación sería \$19.70 MXN.

Los supuestos de este análisis son los siguientes: a) el año de inversión inicial del sistema de BDg fue cuando se recibió el primer apoyo del FIRCO; b) a partir del siguiente año se pudo generar EE; c) de acuerdo con la base de datos del FIRCO, las granjas que sólo recibieron apoyo para instalar un motogenerador y obras accesorias, ya contaban con un BD; d) todos los BD tienen capacidad de generar suficiente biogás para transformarlo en EE que utilizan sus instalaciones y, e) el tipo de cuerpo receptor es A en todos los casos.

En primer lugar, se separaron las granjas según el año en el que recibieron el primer apoyo para instalar el BD. Se calculó las UPA por tipo de granja y número de animales para cada una. Las cifras del análisis de la información del FIRCO y el cálculo de lo que se ahorró en el pago de derechos de descarga de AR están en precios corrientes de diferentes años; por ello, los costos operativos anuales y el ahorro en el pago de derechos se descontaron al año correspondiente utilizando el índice general de inflación anual (BANXICO 2017a).²⁸ De igual manera, los costos operativos y el ahorro por no pago de derechos se proyectaron de 2012 a 2020, con la tasa de inflación del año correspondiente. De 2017 en adelante se utilizó la tasa de inflación anual promedio de los últimos dieciséis años: 4.40 % (BANXICO 2017a).

Más tarde, se simularon los flujos de efectivo para los diez años²⁹ posteriores a la inversión inicial y se descontaron a una tasa de 10.89 %, obtenida mediante el método Capital Asset Pricing Model (CAPM).³⁰ Con los datos anteriores, se calculó el VPN y el periodo de recuperación de la inversión.

Resultados económicos

El resultado del análisis demuestra que cuando los productores logran ahorrar el 100 % del pago de EE debido a la transformación del biogás y hay una disminución

²⁸ De 2009 a 2016 es 3.57%, 4.40%, 3.82%, 3.57%, 3.97%, 4.08%, 2.13% y 3.36 %. El índice general de inflación anual promedio de los últimos dieciséis años fue de 4.40 %.

²⁹ Tiempo de vida útil del BD, motogenerador y obras accesorias.

³⁰ $E(r_i) = r_f + \beta_{im}(r_m - r_f)$, donde: $E(r_i)$ = tasa de descuento; r_f = tasa libre de riesgo: se utilizó 6.92% correspondiente a la tasa de CETES a 364 días del 20 de febrero de 2017 (BANXICO 2017b). β_{im} = beta de mercado: se utilizó la beta promedio de 1.03 del sector agricultura y ganadería (0.92) y la correspondiente a la de la industria de energías verdes y renovables en países emergentes (1.14) (Damodaran 2017); r_m = rendimiento del mercado, obtenido del promedio de rendimiento del Índice de Precios y Cotizaciones (IPC) de los años 2008 al 2016 (BANXICO 2017b).

de 43.4 % en el pago de derechos por descarga de AR, el VPN es siempre negativo y el periodo de recuperación de la inversión es de 32 a 33 años. Es decir, durante los diez años de vida útil del motogenerador y las obras accesorias, los porcicultores no logran recuperar la inversión que ellos desembolsaron en todo el sistema.

El análisis prueba lo que algunos productores afirman: el programa de BD en Yucatán responde a la presión de la autoridad para su instalación y no al interés de los porcicultores para los cuales representa sólo un gasto que se les exige para que la granja pueda seguir operando e incluso expandirse.

CONCLUSIONES

México no es un emisor importante de CH_4 a nivel mundial ni lo es en términos de CH_4 por habitante. Del CH_4 emitido por la ganadería, la fermentación entérica genera 81 % y el tratamiento de residuos sólo 19 %.

Yucatán emite 5.8 % del metano generado en los sistemas de tratamiento de la porcicultura.

El tratamiento de residuos porcinos en Yucatán, con base en sistemas de biodigestión, ha recibido importantes recursos por parte del gobierno, mientras que problemas ambientales locales de mayor impacto, como la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad, no cuentan con estos apoyos.

Por las características de su suelo y su acuífero, la contaminación del manto freático en Yucatán constituye un problema ambiental y de salud muy importante en la región.

El programa de biodigestión en Yucatán responde a varios factores: la presión de la autoridad para su instalación, el incentivo para generar energía eléctrica y ahorrar en el pago por este concepto, así como tratar de cumplir con la normatividad sobre descargas de aguas residuales.

El valor presente neto de la inversión hecha por los porcicultores en el biodigestor, el motogenerador y las obras accesorias, es negativo; su periodo de recuperación es de 32 a 33 años en un escenario de producción del 100 % de la energía eléctrica que generan sus granjas y su disminución, de 43.4 % en el pago de derechos por descarga de aguas residuales.

Salvo casos excepcionales, los biodigestores no está bien manejados. Se encontraron problemas que ya habían sido mencionados en otros estudios y se detectaron algunos nuevos. Su funcionamiento óptimo requiere programas adecuados de capacitación de la mano de obra, asesoría y vigilancia por parte de las autoridades competentes.

El éxito de la política de mitigación de metano mediante la implementación de biodigestores depende directamente de una correcta operación de los mismos. Por ende, para lograrlo, es necesario brindar capacitación más especializada a los usuarios así como seguimiento por parte de la autoridad al funcionamiento de los biodigestores.

El sistema de biodigestión cumple con la importante función de recibir en un solo punto de descarga los residuos que anteriormente se acumulaban en las lagunas de oxidación a cielo abierto o que, simplemente, se descargaban al acuífero. Sin embargo, el problema de contaminación del agua persiste porque el efluente no recibe ningún tratamiento. En el mejor de los casos se diluye para utilizarse en fertirrigación.

El costo del programa ha sido alto, tanto para la autoridad como para los porcicultores, y la contaminación del acuífero sigue siendo un problema grave.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCOCER, Javier *et al.* 1999. “Contaminación del agua subterránea en la Península de Yucatán, México”. *Imagen Veterinaria*, enero-marzo: 41-50.
- Banco de México (BANXICO). 2017a. “Inflación”. Consultado el 20 de febrero de 2017. <http://www.banxico.org.mx/portal-inflacion/inflacion.html>.
- . 2017b. “Índice de Precios y Cotizaciones”. Consultado el 20 de febrero de 2017. <http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF57>.
- BAUTISTA, FRANCISCO. 2010. “EL SUELO”. EN *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. El contexto físico*, edición de Durán Rafael y Martha Méndez, 14-16. Mérida: CICY-PPD, FMAM-CONABIO-SEDUMA.
- BELMAR, Roberto *et al.* 2007a. “Los humedales como parte del tratamiento del agua residual en granjas porcinas”. *Uuy u T'aan*. Órgano Informativo de la Fundación Produce Yucatán 3 (4): 8-10.
- . 2007b. “Los humedales como parte del tratamiento del agua residual en granjas porcinas”. *Uuy u T'aan. Órgano Informativo de la Fundación Produce Yucatán* 3 (6): 1-4.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2017. “Consulta tu tarifa”. Consultado el 2 de abril de 2017. http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC). 2012. *Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. México: SEMARNAT-INECC.
- Damodaran. 2018. “Betas by Sector. Emerging Markets”. Consultado el 12 de abril de 2018. http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2012. “Ley General de Cambio Climático”. Consultado el 26 de mayo de 2016. http://www.inecc.gob.mx/descargas/2012_lgcc.pdf.
- . 2014. “Ley de la Industria Eléctrica”. Consultado el 2 de mayo de 2017. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5355986&fecha=11/08/2014.
- . 2016. “Ley Federal de Derechos en Materia de Agua”. Consultado el 7 de febrero de 2017. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105138/Ley_Federal_de_Derechos.pdf.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). 2009. *Biogas. An introduction*. Alemania: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.
- Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO). 2008. *Nota informativa. Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable SAGARPA-FIRCO-Banco Mundial*. México: SAGARPA.
- . 2010. “PROVAR. Lineamientos Técnicos de Operación 2010”. Consultado el 12 de abril de 2016. http://www.firco.gob.mx/proyectos/provar/Documents/0_Lineamientos_Provar_2010.pdf.

- FLORES, José, Roberto Belmar y Silvia López. 2012. "Plantas con potencial para la limpieza de aguas contaminadas en el Estado de Yucatán, México". Ponencia presentada en el XXVII Congreso Centroamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS 2012 en El Salvador.
- HUNT, Patrick *et al.* 2000. "Treatment of Swine Wastewater in Wetlands with Natural and Agronomic Plants". Proceedings of the 9th International Workshop of the Network General Theme: "Technology Transfer". RAMIRAN 2000. Gargnano, Italia, 6-9 septiembre.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2015. Consultado el 9 de julio de 2015. <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/elmdl.htm>.
- MARTÍNEZ, Miguel. 2015. "Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato". *Nova Scientia* 7 (15): 96-115.
- Molina Center for Strategic Studies in Energy and Environment (MCE²) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2013. *Informe final. Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta en México*. México: MCE²-INECC-SEMARNAT.
- Naciones Unidas. 1998. "Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". Consultado el 13 de septiembre de 2015. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpsan.pdf>.
- . 2017. "Paris Agreement-Status of Ratification". Consultado el 8 de enero. http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php.
- Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2012. *Subíndice de emisiones de gases de efecto invernadero. Metodología de cálculo. Línea de Base del programa de Sustentabilidad de Recursos Naturales*. México: FAO-SAGARPA.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). 2011. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Reino Unido-Estados Unidos: Cambridge University Press.
- PÉREZ, Rosario. 1986. *Aspectos económicos de la porcicultura en México: 1960-1985*. México: Asociación Americana de Soya.
- . 2006. *Granjas porcinas y medio ambiente. Contaminación del agua en La Piedad, Michoacán*. México: Plaza y Valdés-UNAM-SEMARNAT.
- SAGARPA y FIRCO. 2011. "Diagnóstico general de la situación actual de los sistemas de biodigestión en México". Consultado el 24 de abril de 2016. <http://ecotec.unam.mx/Ecotec/wp-content/uploads/Diagnostico-Nacional-de-los-Sistemas-de-Biodigestion.pdf>.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA). 2016. "Entrega-recepción de biodigestores a seis granjas porcícolas". Consultado el 26 de agosto de 2017. <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/noticias/noticia-detalles.php?IdNoticia=513>.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT). 1996. “Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”. Consultado el 17 de marzo de 2016. <http://www.estrucplan.com.ar/Legislacion/Mexico/NOM-001-ECOL.pdf>.
- . 2007. “Iniciativa metano a mercados. México”. Consultado el 26 de enero de 2016. https://www.globalmethane.org/documents/events_ag_20070516_semar-nat_m2m_agropecuario_buenos_aires.pdf.
- . 2009a. “Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012”. Consultado el 19 de septiembre de 2016. http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/programas/Documents/PECC_DOI.pdf.
- . 2009b. “Cuarta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”. Consultado el 15 de junio de 2016. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc4s.pdf>.
- . 2014. “Compendio de estadísticas ambientales”. Consultado el 4 de diciembre de 2016. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/compendio_2014/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet348e.html.
- STEINFELD, Henning *et al.* 2009. *La larga sombra del ganado. Problemas ambientales y opciones*. Traducción española de la edición inglesa de *Livestock's Long Shadow*. Roma: FAO.
- TAIGANIDES, Eliseo, Rosario Haydee Pérez y Ester Girón. 1996. *Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México*. México: Consejo Mexicano de la Porcicultura.
- TREJO, Wilbert *et al.* 2014. “Eficiencia de remoción de materia orgánica de aguas residuales porcinas con biodigestores en el Estado de Yucatán, México”. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, núm. 17: 321-323.

ACRÓNIMOS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

AR	Aguas residuales
BD	Biodigestor
BDg	Proceso de biodigestión
CC	Cambio climático
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
CER	Certificado de reducción de emisiones
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CH ₄	Metano
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CO ₂ e	Bióxido de carbono equivalente
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COP	Conferencia de las Partes
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EE	Energía eléctrica
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
GEI	Gas(es) de efecto invernadero
hr	Horas
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
kg	Kilogramos
kWh	Kilo vatio hora
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LIE	Ley de la Industria Eléctrica
LMO	Límite máximo permisible
MDL	Mecanismo de desarrollo limpio
MXN	Pesos mexicanos
M2M	Metano a Mercados

N	Nitrógeno
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
PK	Protocolo de Kioto
SEDUMA	Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sistema de tratamiento
t	Toneladas
TRH	Tiempo de retención hidráulica
UPA	Unidad de población animal
USD	Dólares americanos
VPN	Valor presente neto