

Sistemas bioenergéticos rurales como mediadores del diseño e innovación socioambiental y autonomía energética

Graciela Ruiz-Aguilar, Sarai Camarena Martínez,
Sergio J. Alejo-López y Héctor G. Nuñez Palenius⁽¹⁾

Resumen: El presente estudio analiza el papel del diseño como mediador entre la ciencia, la tecnología y las comunidades rurales en la implementación de biodigestores tubulares de geomembrana en el estado de Guanajuato, México. Bajo un enfoque cualitativo y transdisciplinar, se combinaron procesos de co-diseño participativo, análisis técnico de la digestión anaerobia y sistematización de experiencias de campo. Los resultados muestran que, de manera general, los biodigestores diseñados de manera contextual alcanzaron concentraciones de metano entre 56.9 % y 67.4 %, con un rendimiento promedio de 0.21 m³ CH₄/kg de sólidos volátiles, confirmando su eficiencia y adaptabilidad. Paralelamente, la participación de productores e investigadores favoreció la apropiación tecnológica, la valorización de residuos orgánicos y la generación de aprendizajes colectivos. Se concluye que el diseño, al integrarse con la biotecnología ambiental y la educación para la sostenibilidad, actúa como un dispositivo de traducción entre el conocimiento científico y saber local, consolidando un modelo de innovación social que promueve la autonomía energética, la resiliencia territorial y la transición hacia una bioeconomía circular.

Palabras clave: diseño sostenible - biodigestores - digestión anaerobia - co-diseño - sostenibilidad social - bioenergía

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 44]

(1) Ver CV en pág. 45

Introducción

En la actualidad, el diseño se concibe como una práctica proyectual que articula la dimensión material, simbólica y social de los procesos humanos. Más que una actividad orientada a la producción de objetos, el diseño es una forma de pensamiento crítico que

media entre las necesidades de las personas, las condiciones del entorno y los sistemas tecnológicos que configuran la vida contemporánea. Como señala Manzini (2015), “diseñar es dar forma a las relaciones entre las personas y su entorno material y social”, lo que implica intervenir creativa y éticamente en los procesos de transformación cultural. De manera complementaria, Bonsiepe (2011) afirma que el diseño constituye una forma de conocimiento aplicado que permite traducir valores sociales en configuraciones materiales, comunicativas y ambientales.

Desde esta perspectiva, el diseño se convierte en una herramienta estratégica para responder a los desafíos ecológicos y sociales del siglo XXI, en los que la sostenibilidad, la equidad y la resiliencia son ejes centrales de acción (Irwin, 2015). En América Latina, esta mirada adquiere especial relevancia, pues permite comprender el diseño como una práctica situada que reconoce los saberes locales y la relación simbiótica entre cultura y territorio (Escobar, 2018).

Los biodigestores rurales constituyen un ejemplo paradigmático de este tipo de diseño social y ambiental. Más allá de su valor tecnológico, los biodigestores representan una mediación entre la ciencia y la vida comunitaria: son dispositivos de innovación que integran procesos biológicos, materiales locales y dinámicas culturales en torno al aprovechamiento de residuos orgánicos. Este tipo de prácticas encarna lo que Manzini (2019) denomina diseño para la sostenibilidad social, en el que las soluciones no solo se orientan a la eficiencia técnica, sino también a la regeneración de vínculos comunitarios y ecológicos.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024), la bioenergía representa el 55 % del consumo global de energía renovable, y se proyecta que su contribución aumente un 30 % para 2030. En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2024) estima que más de 22 millones de toneladas de residuos agroindustriales podrían ser aprovechadas anualmente para la generación de biogás, biofertilizantes y compostas, aunque solo se aprovecha menos del 8 % de dicho potencial. Esta brecha tecnológica refleja la necesidad de promover procesos de transferencia del conocimiento científico hacia las comunidades rurales mediante estrategias de diseño participativo, educación ambiental y co-innovación territorial.

El presente trabajo se enmarca en una línea de investigación aplicada desarrollada en la Universidad de Guanajuato, a través del Laboratorio de Tecnologías para la Sustentabilidad (LATESUG®). En este espacio se han articulado proyectos vinculados con el aprovechamiento integral del agave, la digestión anaerobia y la valorización de residuos agrícolas como procesos educativos y productivos en comunidades rurales del Bajío (Ruiz-Aguilar et al., 2023; Ruiz-Aguilar et al., 2024). Estas experiencias de co-diseño con productores evidencian cómo la biotecnología ambiental puede transformarse en una práctica cultural de sostenibilidad, en la que el territorio se configura como un laboratorio vivo de aprendizaje y resiliencia.

Investigaciones previas del grupo han explorado la optimización del proceso de digestión anaerobia mediante modelos de diseño experimental como el diseño compuesto central (*Central Composite Design*, CCD siglas en inglés), métodos de inteligencia artificial, específicamente redes neuronales artificiales (ANN), y la metodología de despliegue de la función de la calidad (QFD, siglas en inglés) para mejorar la producción de metano a partir de

residuos (Ruiz-Aguilar et al., 2023; Camarena-Martínez et al., 2023; Camarena-Martínez et al., 2024a). Sin embargo, más allá de la eficiencia energética, el valor del diseño radica en su capacidad de traducir conocimiento técnico en prácticas significativas para las comunidades, donde la tecnología se reinterpreta como un proceso educativo y de justicia ambiental (Fry, 2011; Tonkinwise, 2019).

Desde el enfoque del diseño como disciplina de mediación cultural y social, este artículo propone una lectura del diseño ambiental como mediador entre la ciencia y la comunidad. A partir de experiencias de campo con productores rurales en Guanajuato, México, se analiza y se propone cómo el diseño puede integrar la biotecnología ambiental, la educación para la sostenibilidad y la práctica social en un modelo de innovación territorial. El objetivo es evidenciar que los procesos de diseño aplicados al desarrollo de biodigestores rurales no solo producen energía limpia, sino también conocimiento, identidad y cohesión comunitaria, configurando el diseño como una herramienta para la vida.

El diseño como mediación entre ciencia, comunidad y sostenibilidad

El diseño contemporáneo, en su expansión hacia los ámbitos sociales, ambientales y territoriales, ha dejado de ser una disciplina confinada a la estética o la producción material para convertirse en un sistema de mediación entre los distintos modos de conocimiento. En este sentido, el diseño actúa como un dispositivo relacional capaz de traducir principios científicos y tecnológicos en prácticas culturalmente significativas (Manzini, 2015; Fry, 2011). Su valor no reside únicamente en la configuración de artefactos, sino en su capacidad de generar procesos de diálogo, interpretación y apropiación colectiva.

Esta noción del diseño como mediador epistemológico se alinea con lo que Bonsiepe (2020) denomina *proyectualidad crítica*, entendida como el ejercicio de pensamiento que busca vincular la racionalidad técnica con los valores humanos y sociales. En la práctica, ello implica que el diseño puede operar como un lenguaje común entre la ciencia, que produce conocimiento especializado, y la comunidad, que genera conocimiento situado y experiencial. La traducción entre ambos mundos no es neutra, sino una acción política y cultural, en la que el diseñador o diseñadora asume el papel de facilitador del intercambio entre saberes (Escobar, 2018).

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, esta función mediadora adquiere una relevancia estratégica. Los problemas ambientales contemporáneos, como la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad o el cambio climático; son fenómenos de alta complejidad que requieren soluciones interdisciplinarias y colaborativas (Irwin, 2015; Latour, 2018). El diseño, al situarse entre la acción y el conocimiento, tiene el potencial de articular redes transdisciplinarias donde convergen la biotecnología, la educación ambiental, la ingeniería y las prácticas culturales locales. En contextos rurales, esta articulación se traduce en la generación de soluciones tecnológicas apropiadas, como los biodigestores o los sistemas de aprovechamiento de residuos, que integran principios de la bioeconomía circular con formas tradicionales de manejo del territorio (Ruiz-Aguilar et al., 2023).

A diferencia de la transferencia tecnológica convencional, que suele concebirse como un proceso unidireccional, de la universidad hacia la comunidad, el diseño promueve una mediación dialógica, donde la innovación emerge del encuentro entre el conocimiento científico y el conocimiento empírico campesino. En las experiencias documentadas por el LATESUG®, esta mediación se materializa en talleres, patentes, prototipos y metodologías participativas que permiten a los productores comprender, adaptar y mantener tecnologías como los biodigestores, transformando los proyectos en procesos de aprendizaje comunitario (Ruiz-Aguilar et al., 2024).

En esta línea, la educación ambiental se convierte en el marco pedagógico que potencia la función del diseño como mediador social. Sauvé (2016) plantea que la educación ambiental no se limita a la transmisión de información, sino que busca generar experiencias transformadoras donde los individuos desarrollan competencias críticas y participativas frente a los problemas socioecológicos. Así, el diseño se configura como un vehículo didáctico y experiencial que permite a los participantes visualizar los impactos de sus acciones, comprender las interdependencias ecológicas y actuar de manera corresponsable en la gestión de su entorno.

Esta relación entre diseño, educación y sostenibilidad se sustenta también en la teoría de los sistemas socioecológicos (SSE), los cuales reconocen que las comunidades humanas y los ecosistemas están interconectados y coevolucionan mutuamente (Ostrom, 2009). Desde este enfoque, el diseño no solo interviene en el entorno físico, sino también en las dinámicas sociales y culturales que sostienen la resiliencia comunitaria. Los proyectos que integran biodigestores o sistemas de compostaje en comunidades rurales mexicanas, por ejemplo, no solo producen energía o biofertilizantes, sino que transforman las formas de cooperación, organización y aprendizaje local (Tapia, 2022).

El diseño, entendido como la mediación para la sostenibilidad, debe también incorporar una ética del cuidado. Según Puig de la Bellacasa (2017), el cuidado constituye una práctica epistemológica que implica reconocer la vulnerabilidad de los ecosistemas y las relaciones de interdependencia que los sostienen. En este sentido, diseñar para la sostenibilidad no significa únicamente optimizar recursos, sino fomentar culturas del cuidado y la responsabilidad compartida entre seres humanos y naturaleza. Esta visión coincide con lo que Irwin (2018) denomina *transición cultural*, un proceso donde el diseño se orienta hacia el cambio de comportamientos, valores y sistemas de producción, antes que a la creación de nuevos objetos.

En los procesos de innovación socioambiental, esta mediación ética y cultural se traduce en prácticas de co-diseño y diseño participativo. Las metodologías empleadas por LATESUG®, inspiradas en los principios de diseño centrado en la comunidad, evidencian que cuando las personas participan en el diseño de soluciones tecnológicas, aumenta su sentido de apropiación, su motivación por mantener los sistemas y su comprensión sobre los ciclos naturales y energéticos (Ruiz-Aguilar et al., 2023). Este tipo de proyectos ejemplifican lo que Margolin (2018) define como *diseño socialmente responsable*, en el que el conocimiento técnico se alinea con los valores de equidad, inclusión y justicia ambiental. En síntesis, el diseño como mediación entre ciencia, comunidad y sostenibilidad no es un proceso lineal, sino una construcción colectiva que entrelaza saberes, afectos y acciones,

generando la economía circular. Su finalidad no es únicamente resolver un problema técnico, sino producir sentido social y ecológico. Desde esta perspectiva, los proyectos de biodigestores rurales constituyen prácticas de diseño expandido, donde el aprendizaje, la experimentación y la vida cotidiana se entrelazan en un mismo horizonte de transformación. El diseño, así entendido, no solo configura artefactos, sino que cultiva vínculos y regenera territorios.

Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo con componentes analíticos y descriptivos, orientado a comprender los mecanismos de mediación entre ciencia, tecnología y comunidad en la implementación de biodigestores rurales. El propósito metodológico fue examinar los procesos de diseño, adaptación tecnológica y apropiación social de sistemas de digestión anaerobia en contextos rurales del estado de Guanajuato, México. El estudio se estructuró en tres fases complementarias: a) diseño participativo y caracterización contextual, b) sistematización y análisis técnico de experiencias de campo, y c) triangulación teórico-metodológica. Este planteamiento permitió integrar perspectivas provenientes del diseño sostenible, la biotecnología ambiental y la educación para la sostenibilidad, configurando un marco metodológico transdisciplinar que favoreció la comprensión integral del fenómeno.

a) Diseño participativo y caracterización contextual

La primera fase se basó en un enfoque de co-diseño participativo, entendiendo este como un proceso en el que las decisiones proyectuales y tecnológicas se construyen colectivamente entre investigadores, productores, técnicos y estudiantes (Sanders y Stappers, 2014). Se seleccionaron cuatro comunidades rurales de Guanajuato de las municipalidades de Pénjamo, Romita, Santa Catarina y Salamanca, debido a su actividad agropecuaria intensiva y a la disponibilidad de residuos orgánicos con potencial bioenergético.

Durante esta etapa se realizaron diagnósticos socioambientales mediante entrevistas semiestructuradas, observación participante y análisis de residuos agropecuarios, con el fin de identificar las condiciones de generación, manejo y disposición de estiércol, restos vegetales y aguas residuales. La información recolectada permitió definir los criterios técnicos para la instalación de los biodigestores, considerando variables como volumen de sustrato, relación sustrato/inóculo (S/I), temperatura promedio y frecuencia de alimentación, siguiendo la metodología experimental descrita por Camarena-Martínez *et al.*, 2020. El proceso de diseño se guió por los principios de “diseño centrado en la comunidad”, privilegiando la funcionalidad, el mantenimiento autónomo y la utilización de materiales disponibles localmente. Se desarrollaron diagramas de flujo, prototipos de bajo costo y mapas de actores, que facilitaron la comprensión colectiva de los sistemas de biodigestión y su integración en los ciclos productivos rurales.

b) Sistematización y análisis técnico de experiencias de campo

En la segunda fase se llevó a cabo la instalación y monitoreo de biodigestores tubulares de geomembrana de capacidades entre 10,000 y 30,000 L, en colaboración con el LATESUG® de la Universidad de Guanajuato. Los sustratos utilizados correspondieron principalmente a estiércol bovino y vacuno con mezclas de residuos lignocelulósicos.

El desempeño de los sistemas fue evaluado con base en indicadores técnicos de producción de biogás, concentración de metano, temperatura interna, pH del efluente y volumen de sólidos volátiles reducidos. Se verificó el contenido de metano mediante cromatografía de gases (Camarena-Martínez *et al.*, 2020). La caracterización del efluente se efectuó conforme a los lineamientos de la American Public Health Association (APHA, 2017), con énfasis en la calidad del biofertilizante obtenido.

Paralelamente, se implementaron bitácoras de operación participativas, donde los usuarios registraron incidencias, mantenimiento y observaciones sobre la eficiencia percibida del sistema. Este ejercicio permitió complementar la información técnica con datos de percepción social y adaptación cultural, integrando dimensiones cuantitativas y cualitativas del desempeño del biodigestor.

Para sistematizar los hallazgos, se utilizó un análisis narrativo y categorial (Clandinin y Connelly, 2000), centrado en identificar las relaciones entre el aprendizaje técnico, las prácticas agrícolas y las dinámicas comunitarias derivadas de la implementación del sistema. Las categorías analíticas incluyeron: eficiencia técnica, apropiación tecnológica y transformación de prácticas de manejo de residuos.

c) Triangulación teórico-metodológica

La tercera fase consistió en la triangulación entre los resultados empíricos y los marcos conceptuales del diseño para la transición (Irwin, 2015), la teoría de los sistemas socioecológicos (Ostrom, 2009) y la educación ambiental crítica (Sauvé, 2016). Esta integración permitió interpretar los procesos de co-diseño no solo como prácticas de innovación tecnológica, sino como ejercicios de mediación epistémica entre el conocimiento científico y los saberes locales.

Se emplearon tres herramientas de análisis complementarias:

1. Una matriz de correspondencias conceptuales que relaciona los principios del diseño sostenible con los resultados técnicos y sociales observados.
2. Un esquema de codificación axial (Strauss y Corbin, 2008) para el procesamiento de testimonios y registros de campo, lo que facilitó la identificación de patrones y relaciones causales entre las variables estudiadas.
3. Sesiones de validación participativa en las comunidades involucradas, donde los resultados preliminares fueron discutidos y reinterpretados colectivamente para garantizar su pertinencia contextual.

La metodología adoptada permitió abordar el diseño no solo como un instrumento de desarrollo tecnológico, sino como un proceso de construcción de conocimiento socialmente distribuido. Esta perspectiva posibilita analizar los biodigestores rurales como sistemas híbridos que integran componentes técnicos, ecológicos y culturales, contribuyendo al fortalecimiento de la sostenibilidad territorial y al avance de la biotecnología ambiental desde un paradigma de innovación social.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos durante el proceso de co-diseño, instalación y operación de biodigestores rurales evidencian una estrecha relación entre los aspectos técnicos del sistema, los procesos de aprendizaje colectivo y la apropiación social de la tecnología. A lo largo de tres años de implementación (2022–2024), se desarrollaron seis experiencias de campo que involucran comunidades rurales de Pénjamo, Romita, Santa Catarina y Salamanca, en colaboración con el LATESUG*. Estas experiencias permitieron observar cómo el diseño, entendido como proceso de mediación, facilitó la integración del conocimiento científico en prácticas productivas locales y, al mismo tiempo, promovió nuevas formas de organización y cooperación comunitaria.

Eficiencia técnica y adaptabilidad del sistema

Desde el punto de vista técnico, los biodigestores instalados presentaron un comportamiento estable en términos de producción de biogás, rendimiento energético y aprovechamiento del efluente como biofertilizante. Por ejemplo, el biodigestor tubular de 10,000 L operado en condiciones semicontinuas, instalado en la comunidad de El Copal, tuvo una producción promedio de metano de 67.4 %, y la medición de temperatura interna del biodigestor permaneció relativamente estable (26.0 – 30.0 °C), cifras coherentes con estudios previos del grupo (Camarena-Martínez *et al.*, 2020; Ruiz-Aguilar *et al.*, 2023).

El equipo de investigación documentó que los sistemas de geomembrana tubular presentaron ventajas de bajo costo, rápida instalación y facilidad de mantenimiento. En los registros de campo, los productores identificaron como beneficios inmediatos la reducción de olores, la mejora de la higiene en los corrales y la disponibilidad de un fertilizante líquido que se aplicaba directamente al suelo. Estos hallazgos coinciden con los resultados de Gurrrola Armendáriz (2016), quien reportó beneficios similares en comunidades mezcleras del norte de México.

Un aspecto relevante fue la adaptabilidad del diseño. En comunidades con limitaciones de espacio, los investigadores implementaron biodigestores modulares de menor volumen, mientras que en localidades con alta producción de estiércol bovino se optó por sistemas de 30,000 L con doble entrada de sustrato. Esta flexibilidad permitió ajustar los diseños a las condiciones productivas locales y favoreció la apropiación tecnológica. Como señaló un productor durante una entrevista en Santa Catarina:

“El biodigestor no vino hecho, lo fuimos haciendo entre todos; los ingenieros pusieron la idea y nosotros pusimos el lugar, el estiércol y las manos.”

Este testimonio sintetiza el principio de diseño participativo aplicado en el proyecto: el conocimiento técnico se complementa con la experiencia práctica, generando soluciones que emergen del diálogo más que de la transferencia unidireccional de tecnología.

Aprendizajes de los investigadores: del laboratorio al territorio

Para los investigadores, el trabajo en campo representó una oportunidad para validar experimentalmente resultados obtenidos en laboratorio y, al mismo tiempo, reinterpretar el proceso de diseño desde la realidad territorial. Los registros etnográficos del equipo de LATESUG® señalan que la observación de los sistemas en operación permitió ajustar parámetros de carga, temperatura y tiempo de retención hidráulica (HRT) según las variaciones climáticas locales. En zonas semiáridas como Romita, se detectaron descensos de temperatura en temporada invernal que afectaban la metanogénesis; para contrarrestarlo, se diseñaron cubiertas de policarbonato y canaletas solares de bajo costo, una innovación surgida de la interacción entre productores y técnicos.

Asimismo, se constató que la transferencia del conocimiento no se limita a la capacitación inicial, sino que requiere un acompañamiento constante. Los investigadores adoptaron una metodología de “seguimiento colaborativo”, mediante la cual los estudiantes de licenciatura y posgrado visitaban periódicamente las comunidades para medir variables físico-químicas y recabar observaciones de los usuarios. Este proceso fortaleció las competencias técnicas de los estudiantes, pero también fomentó una comprensión más profunda de los contextos socioculturales en los que operan las tecnologías sostenibles.

Como comentó una de las investigadoras participantes:

“En el laboratorio podemos controlar cada variable, pero en el campo aprendemos que el diseño debe dialogar con el clima, la costumbre y el ritmo de la comunidad. Ahí es donde realmente ocurre la innovación.”

Este enfoque se alinea con lo planteado por Irwin (2018) sobre el diseño para la transición, en el que los procesos de innovación se comprenden como ejercicios de aprendizaje mutuo entre ciencia y sociedad.

Experiencias de los productores: apropiación tecnológica y sostenibilidad social

En las comunidades participantes, los productores asociaron el biodigestor no solo con la generación de biogás, sino con un símbolo de autonomía energética. Los talleres de uso y mantenimiento impulsaron dinámicas de colaboración entre familias, quienes organizaron turnos de alimentación del sistema y compartieron el gas generado para cocinar o calentar agua.

Esta dimensión social del proyecto reforzó la cohesión comunitaria y favoreció la permanencia de los equipos en operación, a diferencia de experiencias previas donde los sistemas fueron abandonados por falta de seguimiento técnico (Narváez Suárez *et al.*, 2016).

En Romita, por ejemplo, los productores adaptaron una válvula casera para aprovechar el gas directamente en estufas tradicionales, reduciendo el consumo de leña. En Santa Catarina, el efluente líquido se mezcló con residuos de hortalizas para producir composta enriquecida, mejorando la calidad del suelo. Estas acciones, no previstas originalmente en el diseño, ilustran la capacidad de innovación local y la flexibilidad del sistema.

De acuerdo con la sistematización de testimonios, los principales aprendizajes expresados por los productores fueron:

1. Comprensión de los procesos biológicos de fermentación y producción de gas.
2. Revalorización de los residuos orgánicos como recurso energético y fertilizante.
3. Desarrollo de habilidades técnicas básicas de mantenimiento y monitoreo.

Estos aprendizajes reflejan un tránsito desde la dependencia tecnológica hacia la autogestión, coherente con el planteamiento de Sauvé (2016) sobre la educación ambiental crítica como medio para fortalecer la participación social en la sostenibilidad.

Mediación del diseño: ciencia, práctica y cultura

El análisis integral de las experiencias confirma que el diseño cumplió una función de mediación triple: técnica, pedagógica y cultural. En lo técnico, permitió adaptar los biodigestores a las condiciones de cada comunidad; en lo pedagógico, permitió procesos de aprendizaje significativo a través de la experimentación; y en lo cultural, permitió resignificar la relación de los productores con su entorno, al convertir los residuos agropecuarios en fuente de energía y bienestar.

La mediación cultural del diseño se evidenció también en los materiales comunicativos elaborados por los estudiantes de la Universidad de Guanajuato: manuales ilustrados, infografías y videos educativos que traducían los principios de la digestión anaerobia a un lenguaje accesible. Estas herramientas, inspiradas en el concepto de diseño para la divulgación científica (Bonsiepe, 2020), reforzaron la apropiación del conocimiento técnico. En conjunto, los resultados demuestran que la práctica del diseño participativo contribuyó a la creación de ecosistemas de innovación local, donde la frontera entre investigador y productor se diluye. Este hallazgo coincide con las perspectivas de Ostrom (2009) sobre los sistemas socioecológicos, al evidenciar que la sostenibilidad depende no solo del manejo eficiente de los recursos, sino de la capacidad colectiva de aprendizaje y cooperación. La triangulación de los datos técnicos, narrativos y participativos sugiere que el modelo de trabajo implementado en este estudio no solo mejora los indicadores de rendimiento energético, sino que fortalece las dimensiones sociales de la sostenibilidad. Los biodigestores rurales se constituyen como dispositivos de diseño expandido que integran ciencia básica y aplicada, innovación social y educación ambiental.

Desde el punto de vista teórico, los resultados confirman la pertinencia de considerar el diseño como mediador epistemológico (Fry, 2011; Escobar, 2018), capaz de transformar el conocimiento científico en experiencias de vida. Desde el plano práctico, evidencian que la sostenibilidad no se logra mediante la transferencia de tecnología, sino a través de procesos colaborativos donde el conocimiento se trans-construye. En términos de impacto, los proyectos generaron mejoras medibles en la eficiencia energética de los sistemas domésticos, redujeron la quema de residuos orgánicos y fortalecieron las prácticas agrícolas regenerativas mediante el uso de biofertilizantes. Sin embargo, su mayor logro radica en haber establecido una plataforma de diálogo entre universidad y comunidad, donde el diseño se consolida como un agente de traducción entre ciencia, práctica y cultura.

Conclusiones

El análisis de las experiencias desarrolladas en comunidades rurales del estado de Guanajuato demuestra que la aplicación del diseño como herramienta metodológica y epistémica en proyectos de biodigestión anaerobia contribuye de manera significativa tanto a la optimización técnica del proceso como a la generación de impactos socioambientales sostenibles. Los resultados obtenidos confirman que los sistemas de biodigestores tubulares, cuando son concebidos bajo esquemas de trans-diseño y participación comunitaria, pueden adaptarse eficazmente a diferentes contextos productivos, climáticos y culturales, manteniendo niveles estables de producción de metano y eficiencia energética.

Desde el punto de vista técnico, las mediciones de campo revelaron composiciones de gas rica en metano (64.5 ± 2.9 %), indicadores comparables con sistemas industriales de mayor escala. La versatilidad de los biodigestores instalados permitió ajustar su capacidad operativa de acuerdo con la disponibilidad de sustratos y la dinámica productiva local, evidenciando que el diseño estructural flexible es un factor determinante para la sostenibilidad de estos sistemas.

En términos de apropiación social, el proceso participativo promovió una comprensión más profunda de los principios biotecnológicos y de los beneficios asociados a la valorización de los residuos agropecuarios. Los productores participantes incorporaron la tecnología en sus prácticas cotidianas, generando innovaciones empíricas —como el acoplamiento de válvulas artesanales o el uso combinado de efluentes con composta vegetal— que ampliaron el impacto del proyecto y demostraron la capacidad de aprendizaje colectivo de las comunidades rurales.

Para los investigadores, las experiencias de campo evidenciaron la necesidad de concebir la tecnología no como un producto cerrado, sino como un sistema en evolución sujeto a retroalimentación continua. El trabajo colaborativo entre técnicos y productores facilitó la identificación de variables críticas en la operación de los biodigestores —particularmente la temperatura, la relación sustrato/inóculo y la gestión del efluente—, permitiendo generar ajustes precisos y validar experimentalmente los resultados obtenidos en laboratorio. Este enfoque confirma la pertinencia de los modelos de investigación aplicada que combinan observación empírica, análisis técnico y procesos de diseño iterativo.

El estudio también destaca el papel del diseño como mediador entre ciencia y sociedad. Lejos de limitarse a la dimensión formal o instrumental, el diseño actúa como un dispositivo de traducción y articulación entre conocimientos especializados y saberes locales. La mediación generada en torno a los biodigestores permitió establecer un lenguaje común entre investigadores y productores, reduciendo la brecha entre el conocimiento científico y las prácticas tradicionales. Esta función mediadora es fundamental para promover la sostenibilidad social y ecológica, pues posibilita la construcción de soluciones tecnológicas contextualizadas y culturalmente pertinentes.

Los resultados sugieren que la sostenibilidad de los sistemas de biodigestión rural depende no solo de su rendimiento energético, sino de la consolidación de redes colaborativas de gestión y aprendizaje. La continuidad de estos proyectos requiere fortalecer las capacidades locales para el mantenimiento de los equipos, establecer mecanismos de monitoreo participativo y garantizar la retroalimentación entre los actores involucrados. En este sentido, el diseño participativo se presenta como una metodología eficiente para integrar la dimensión tecnológica con la dimensión social, generando procesos de innovación que trascienden el ámbito experimental.

En conclusión, el diseño de sistemas de biodigestión rural orientado por principios de sostenibilidad, participación y adaptación territorial constituye una alternativa viable para la mitigación de impactos ambientales y la diversificación energética en regiones agropecuarias. Su aplicación favorece la transición hacia modelos de economía circular, promueve la resiliencia comunitaria y demuestra que la articulación entre biotecnología y diseño puede producir soluciones efectivas, accesibles y sostenibles.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Internacional de Energía [IEA]. (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). APHA-AWWA-WEF.
- Bonsiepe, G. (2011). *Del objeto a la interfaz: Mutaciones del diseño*. Ediciones Infinito.
- Bonsiepe, G. (2020). *Interface: An approach to design*. Bloomsbury Academic.
- Camarena Martínez, R., Calderon-Andrade, S., & Camarena Martínez, S. (2023). Análisis de las preferencias de los clientes para adquisición de biodigestores a través del QFD. *Revista oficial de la federación global de profesiones A.C. (FEGLININ)*. Recuperado a partir de https://www.researchgate.net/publication/388419176_Analisis_de_las_preferencias_de_los_clientes_para_adquisicion_de_biodigestores_a_traves_de_QFD
- Camarena Martínez, R., Camarena Martínez, S., & Barrios Sánchez, J. M. (2024a). Aplicación de un modelo híbrido de optimización por enjambre de partículas y red neuronal artificial para la predicción de fugas en biodigestores. *Jóvenes en la ciencia*, 25, 1–8. Recuperado a partir de <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4221>

- Camarena-Martínez, S., Martínez-Martínez, J. H., Delgado-Galván, L. V., Ruiz-Aguilar, G. M. L., Olalde-Portugal, V. (2024b). *Evaluación de diferentes parámetros durante el desempeño de un biodigestor de geomembrana tubular alimentado con estiércol vacuno*. En *Avances científicos y tecnológicos en México I: Biotecnología y Ciencias Agropecuarias* (pp. 176–186). Centro de Investigaciones en Óptica / CONAHCYT.
- Camarena-Martínez, S., Martínez-Martínez, J. H., Saldaña-Robles, A., Nuñez-Palenius, H. G., Costilla-Salazar, R., Valdez-Vazquez, I., ... & Ruiz-Aguilar, G. M. (2020). Effects of experimental parameters on methane production and volatile solids removal from tomato and pepper plant wastes. *BioResources*, 15(3), 4763.
- Clandinin, D. J., y Connelly, F. M. (2000). *Narrative inquiry: Experience and story in qualitative research*. Jossey-Bass.
- Escobar, A. (2018). *Designs for the pluriverse: Radical interdependence, autonomy, and the making of worlds*. Duke University Press.
- Fry, T. (2011). *Design as politics*. Berg Publishers.
- Gurrola Armendáriz, D. L. (2016). *Aprovechamiento integral del bagazo de agave mezcalero cocido para su uso en la agricultura y ganadería* [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional.
- Irwin, T. (2015). Transition design: A proposal for a new area of design practice, study, and research. *Design and Culture*, 7(2), 229–246. <https://doi.org/10.1080/17547075.2015.1051829>
- Irwin, T. (2018). The emerging transition design approach. En F. Ceschin, I. Gaziulusoy, y T. Irwin (Eds.), *Designing for sustainability transitions* (pp. 15–38). Routledge.
- Latour, B. (2018). *Down to earth: Politics in the new climatic regime*. Polity Press.
- Manzini, E. (2015). *Design, when everybody designs: An introduction to design for social innovation*. MIT Press.
- Manzini, E. (2019). *Politics of everyday life: Design for social innovation and sustainability*. Bloomsbury.
- Margolin, V. (2018). *The politics of the artificial: Essays on design and design studies*. University of Chicago Press.
- Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023*. Nueva York: Naciones Unidas. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023>
- Narváez Suárez, A. U., Martínez Saldaña, T., y Jiménez Velázquez, M. A. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola*, 56, 33–44.
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Papanek, V. (1985). *Design for the real world: Human ecology and social change*. Thames and Hudson.
- Puig de la Bellacasa, M. (2017). *Matters of care: Speculative ethics in more than human worlds*. University of Minnesota Press.
- Ruiz-Aguilar, G. M. L., Alejo-López, S. J., y Nuñez-Palenius, H. G. (2025). *Cuando el agave enseña: primeros pasos hacia un modelo educativo comunitario en Guanajuato*. Universidad de Guanajuato. En proceso de revisión.

- Ruiz-Aguilar, G. M. L., Camarena-Martínez, S., y Núñez-Palenius, H. G. (2024). *Impacto de un efluente anaeróbico y de un consorcio bacteriano en la producción acelerada de lombricomposta*. En *Avances científicos y tecnológicos en México I: Biotecnología y Ciencias Agropecuarias* (pp. 362–373). Centro de Investigaciones en Óptica / CONAHCYT.
- Ruiz-Aguilar, G. M., Martínez-Martínez, J. H., Costilla-Salazar, R., y Camarena-Martínez, S. (2023). Using central composite design to improve methane production from anaerobic digestion of tomato plant waste. *Energies*, 16(14), 5412. <https://doi.org/10.3390/en16145412>
- Sanders, E. B. N., y Stappers, P. J. (2014). Probes, toolkits and prototypes: Three approaches to making in codesigning. *CoDesign*, 10(1), 5–14. <https://doi.org/10.1080/15710882.2014.888183>
- Sauvé, L. (2016). Educación ambiental y desarrollo sostenible: enfoques y retos. *Revista de Educación Ambiental y Sostenibilidad*, 1(1), 1–14. https://doi.org/10.25267/Rev_educ_ambient_sostenibilidad.2016.v1.i1.010
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2024). *Inventario nacional de residuos agroindustriales y potencial energético 2024*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Strauss, A., y Corbin, J. (2008). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Tapia, H. A. (2022). *Caracterización del sistema socioecológico de agave y su aportación a los servicios ecosistémicos: El caso del estado de Aguascalientes* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Tonkinwise, C. (2019). *Design after design*. Bloomsbury Academic.

Abstract: This study examines the role of design as a mediator between science, technology, and rural communities in the implementation of geomembrane tubular biodigesters in the state of Guanajuato, Mexico. Adopting a qualitative and transdisciplinary approach, it combined participatory co-design processes, technical analysis of anaerobic digestion, and systematization of field experiences. The results show that, in general, contextually designed biodigesters achieved methane concentrations ranging from 56.9% to 67.4%, with an average yield of 0.21 m³ CH₄/kg of volatile solids, confirming their efficiency and adaptability. At the same time, the active involvement of producers and researchers fostered technological appropriation, organic waste valorization, and collective learning processes. It is concluded that design, when integrated with environmental biotechnology and education for sustainability, functions as a translation device between scientific knowledge and local wisdom, consolidating a model of social innovation that promotes energy autonomy, territorial resilience, and the transition toward a circular bioeconomy.

Keywords: Sustainable design - biodigesters - anaerobic digestion - co-design - social sustainability - bioenergy

Resumo: O presente estudo analisa o papel do design como mediador entre a ciência, a tecnologia e as comunidades rurais na implementação de biodigestores tubulares de geomembrana no estado de Guanajuato, México. Sob uma abordagem qualitativa e transdisciplinar, combinaram-se processos de co-design participativo, análise técnica da digestão anaeróbia e sistematização de experiências de campo. Os resultados mostram que, de modo geral, os biodigestores concebidos de forma contextual alcançaram concentrações de metano entre 56,9% e 67,4%, com um rendimento médio de 0,21 m³ CH₄/kg de sólidos voláteis, confirmando sua eficiência e adaptabilidade. Paralelamente, a participação de produtores e pesquisadores favoreceu a apropriação tecnológica, a valorização dos resíduos orgânicos e a geração de aprendizagens coletivas. Conclui-se que o design, ao integrar-se com a biotecnologia ambiental e a educação para a sustentabilidade, atua como um dispositivo de tradução entre o conhecimento científico e o saber local, consolidando um modelo de inovação social que promove a autonomia energética, a resiliência territorial e a transição para uma bioeconomia circular.

Palavras-chave: Design sustentável - biodigestores - digestão anaeróbia - co-design - sustentabilidade social - bioenergia

[Las traducciones de los abstracts fueron supervisadas por el autor de cada artículo.]

Graciela Ruiz-Aguilar. Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca, México.

Sarai Camarena Martínez. Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca, México.

Sergio J. Alejo-López. Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra, México.

Héctor G. Nuñez Palenius. Universidad de Guanajuato Campus Irapuato-Salamanca, México.