Revista de I+D TECNOLÓGICO
Portal de revistas: http://revistas.utp.ac.pa

Electrificación solar fotovoltaica en comunidades rurales de Panamá: revisión sistemática de la evidencia disponible

Solar photovoltaic electrification in rural communities in Panama: a systematic review of the available evidence

*Aldo Domínguez[1], Mario Acevedo[1], Luis Arrocha[1], Edwin Collado[1,2,3], Yessica Saez[1,2,3] **
[1]Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, [2]Centro Regional de Azuero, Grupo de Investigación en Ingeniería, Tecnologías y Sistemas Inteligentes aplicados a la sociedad (ITSIAS), Los Santos, Panamá, [3]Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP), Panamá

***Autor de correspondencia:** yessica.saez@utp.ac.pa

RESUMEN. El presente estudio analiza sistemáticamente la evidencia científica disponible sobre la implementación de sistemas solares fotovoltaicos para la electrificación de comunidades rurales de Panamá, con énfasis en los desafíos técnicos, económicos y sociales asociados a su adopción. Mediante una revisión bibliográfica estructurada siguiendo las directrices PRISMA, se examinaron 15 publicaciones, de las cuales dos constituyen evidencia principal sobre experiencias de electrificación solar rural en Panamá, cinco aportan información contextual nacional y ocho corresponden a literatura internacional complementaria. Los estudios principales documentan el sistema híbrido solar-eólico de Boca de Lurá y una experiencia de aprovechamiento fotovoltaico en Loma Muleto. Los resultados destacan la importancia de considerar las condiciones locales, la operación y el mantenimiento, el financiamiento y la participación comunitaria para favorecer la sostenibilidad de estas soluciones. Asimismo, se identifican limitaciones en la disponibilidad de datos sobre el desempeño energético, la efectividad de los modelos de implementación y los impactos socioeconómicos y ambientales a largo plazo. Se concluye que es necesario desarrollar investigaciones de campo con indicadores verificables y seguimiento longitudinal para fortalecer la toma de decisiones sobre electrificación solar rural en Panamá.
Palabras clave. *Desarrollo sostenible, electrificación rural, energía solar, energías renovables, sistemas fotovoltaicos*

ABSTRACT. This study systematically analyzes the available scientific evidence on the implementation of solar photovoltaic systems for the electrification of rural communities in Panama, emphasizing the technical, economic, and social challenges associated with their adoption. Through a structured literature review following PRISMA guidelines, 15 publications were examined, of which two provide primary evidence on rural solar electrification experiences in Panama, five contribute national contextual information, and eight constitute complementary international literature. The primary studies document the solar-wind hybrid system in Boca de Lurá and a photovoltaic implementation experience in Loma Muleto. The findings highlight the importance of local conditions, operation and maintenance, financing, and community participation in supporting the sustainability of these solutions. The review also identifies limitations in the availability of data on energy performance, the effectiveness of implementation models, and long-term socioeconomic and environmental impacts. It concludes that field studies incorporating verifiable indicators and longitudinal monitoring are needed to strengthen decision-making regarding rural solar electrification in Panama.
Keywords. Sustainable development, rural electrification, solar energy, renewable energy, photovoltaic systems

1. Introducción

Aunque en las últimas décadas el acceso a la electricidad en Panamá ha mejorado, las áreas rurales aún enfrentan una gran brecha en términos de electrificación. Según Madriz-Vargas et al., en 2012 el 79,8% de las zonas rurales de este país contaban con electricidad, lo que significa que una parte considerable de la población aún no tenía acceso a este servicio básico [1]. Esta disparidad tiene serias implicaciones sociales y económicas. Como menciona Jiménez et al. en 2019, alrededor de 4 de cada 10 panameños viven en condiciones de pobreza, y el acceso a la electricidad es

Citación: A. Dominguez, M. Acevedo, L. Arrocha, E. Collado y Y. Sáez, "Electrificación solar fotovoltaica en comunidades rurales de Panamá: revisión sistemática de la evidencia disponible", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 22, no. 2, pp. (0), 2026.
Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 14 de enero de 2025. **Recibido con correcciones:** 19 de octubre de 2026. **Aceptado:** 19 de octubre de 2026.
DOI.
Copyright: 2026 A. Dominguez, M. Acevedo, L. Arrocha, E. Collado y Y. Sáez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

clave para mejorar su calidad de vida [2]. La falta de electricidad en comunidades rurales no solo frena el desarrollo, sino que también agrava las desigualdades sociales.

La energía solar, como fuente renovable y sostenible, puede cambiar esta realidad y llevar electricidad a esas comunidades. Implementar paneles solares ofrece ventajas muy atractivas en este escenario. Panamá, gracias a su ubicación geográfica, recibe altos niveles de radiación solar, especialmente durante la estación seca, lo que lo convierte en un sitio ideal para aprovechar la energía solar fotovoltaica.

Estudios anteriores han demostrado que, en áreas remotas, donde la expansión de la red eléctrica tradicional es complicada y costosa, los paneles solares son una solución técnica y económicamente viable. Marín-Jiménez y González-Cruz destacan la importancia de considerar aspectos técnicos, económicos, logísticos y regulatorios al diseñar parques solares, y cómo los avances tecnológicos y la economía de escala han ayudado a reducir los costos, haciendo que la energía solar sea más accesible [3]. Además de ser económicamente viable, la energía solar ofrece importantes beneficios ambientales, ya que reduce la dependencia de los combustibles fósiles y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

El objetivo de este estudio es analizar sistemáticamente la evidencia científica disponible sobre la electrificación mediante sistemas solares fotovoltaicos en comunidades rurales de Panamá, identificando las principales barreras para su implementación, los modelos de gestión utilizados, las posibilidades de integración con otras fuentes renovables, los impactos sociales, económicos y ambientales documentados y las necesidades de investigación y desarrollo. Para ello, se consideran como evidencia principal los estudios que examinan experiencias de electrificación solar rural en Panamá, mientras que las investigaciones nacionales de carácter contextual y la literatura internacional se utilizan como antecedentes complementarios para interpretar los hallazgos e identificar vacíos de conocimiento.

2. Materiales y Métodos

Para asegurar la transparencia y reproducibilidad de este estudio, llevamos a cabo una revisión sistemática que identificó, evaluó y sintetizó la evidencia disponible sobre la implementación de paneles solares en áreas rurales de Panamá. Siguiendo las directrices de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), este enfoque garantiza un análisis riguroso y transparente de la literatura científica.

2.1. Preguntas de investigación

A continuación, se presentan las preguntas clave que guiaron este estudio. Estas preguntas fueron formuladas para estructurar la revisión sistemática y abordar los temas más importantes relacionados con la implementación de paneles solares en comunidades rurales sin acceso a electricidad en Panamá:

P1. ¿Cuáles son las principales barreras y desafíos para implementar con éxito proyectos de energía solar fotovoltaica en comunidades rurales de Panamá?Además, ¿qué soluciones se pueden aplicar para superar estos obstáculos de manera efectiva?

P2. ¿Qué modelos de implementación han demostrado ser más efectivos para proyectos de energía solar en áreas rurales de Panamá? Con esta pregunta se busca analizar factores como la propiedad, la gestión, el financiamiento y la participación de la comunidad.

P3. ¿De qué manera se pueden combinar la energía solar fotovoltaica y otras fuentes de energía renovable en Panamá para crear sistemas híbridos? El objetivo de esta pregunta es identificar si con sistemas híbridos se puede mejorar la confiabilidad y la eficiencia energética en las comunidades rurales mediante estas combinaciones.

P4. ¿Qué impactos sociales, económicos y ambientales tiene la instalación de paneles solares en estas áreas rurales? Y, sobre todo, ¿cómo podemos maximizar los beneficios mientras minimizamos los posibles efectos negativos?

P5. ¿Qué estrategias de investigación y desarrollo se necesitan para fomentar la innovación y la adaptación de la tecnología solar fotovoltaica en las comunidades rurales de Panamá?

2.2. Proceso detallado de búsqueda

Para el desarrollo de esta revisión sistemática, se seleccionaron tres fuentes de información bibliográfica: Google Scholar, IEEE Xplore y SciELO, considerando su cobertura de publicaciones científicas y técnicas en áreas relacionadas con energía, ingeniería y ciencias sociales.

La estrategia de búsqueda se estructuró a partir de términos relacionados con la energía solar fotovoltaica, la electrificación rural y el contexto geográfico de Panamá. Se utilizaron palabras clave como "energía

solar fotovoltaica", "electrificación rural", "comunidades rurales", "Panamá", "energías renovables" y "sistemas fotovoltaicos". Para combinar los términos y delimitar los resultados, se emplearon operadores booleanos AND y OR, mediante expresiones como ("energía solar fotovoltaica" OR "sistemas fotovoltaicos") AND ("electrificación rural" OR "comunidades rurales") AND "Panamá".

La búsqueda bibliográfica se realizó durante el segundo semestre de 2024 y se delimitó a publicaciones en español e inglés correspondientes al período comprendido entre enero de 2013 y septiembre de 2023. Esta delimitación permitió identificar antecedentes científicos y técnicos relacionados con la implementación de sistemas solares fotovoltaicos para la electrificación de comunidades rurales panameñas.

Como resultado de la búsqueda en las tres fuentes de información, se recuperaron 25 registros bibliográficos, distribuidos entre Google Scholar (15), SciELO (7) e IEEE Xplore (3). Los registros se organizaron y almacenaron mediante el gestor bibliográfico Zotero para facilitar su posterior revisión, aplicación de los criterios de selección y análisis.

2.3. Criterios de Inclusión y Exclusión

Para garantizar la pertinencia de los estudios seleccionados y su correspondencia con los objetivos de la revisión, se establecieron criterios de inclusión y exclusión considerando el ámbito geográfico, el enfoque temático, el tipo de investigación y la disponibilidad de información metodológica y de resultados.

La selección de estudios se centró en investigaciones relacionadas con la implementación de sistemas solares fotovoltaicos para la electrificación de comunidades rurales de Panamá, incluyendo soluciones independientes y sistemas híbridos que combinan la energía solar con otras fuentes renovables. Se consideraron investigaciones que proporcionaran evidencia sobre la viabilidad, implementación, operación y sostenibilidad de estas tecnologías, así como sus implicaciones técnicas, económicas, sociales y ambientales.

Criterios de inclusión

Se consideraron elegibles para la síntesis principal los estudios que cumplieran con los siguientes criterios:

- **Ámbito geográfico:** Investigaciones desarrolladas en Panamá que abordaran directamente la electrificación de comunidades rurales mediante sistemas solares fotovoltaicos, independientes o híbridos.
- **Estudios de caso:** Investigaciones que documentaran experiencias de diseño, instalación, operación, mantenimiento o evaluación de proyectos de electrificación solar en comunidades rurales panameñas.
- **Estudios de viabilidad:** Investigaciones que analizaran la factibilidad técnica, económica, social o ambiental de implementar sistemas solares fotovoltaicos en áreas rurales del país, incluyendo la evaluación de recursos energéticos y las condiciones necesarias para su aprovechamiento.
- **Políticas públicas y modelos de implementación:** Estudios que examinaran programas, políticas, mecanismos de financiamiento o modelos de gestión relacionados directamente con proyectos de electrificación solar rural en Panamá.
- **Impactos socioeconómicos y ambientales:** Investigaciones que evaluaran los efectos de la electrificación solar en las condiciones de vida de las comunidades rurales, incluyendo aspectos relacionados con el acceso a servicios básicos, las actividades productivas, la participación comunitaria y la sostenibilidad ambiental.

Criterios de exclusión

Se excluyeron de la síntesis principal los estudios que presentaran alguna de las siguientes características:

- **Falta de pertinencia geográfica:** Investigaciones desarrolladas fuera de Panamá cuyos resultados no correspondieran directamente al contexto de electrificación rural del país.
- **Enfoque temático no relacionado:** Estudios centrados exclusivamente en aplicaciones de energía solar térmica o en tecnologías que no contemplaran la generación fotovoltaica de electricidad.
- **Ausencia de relación con la electrificación rural:** Investigaciones enfocadas en aplicaciones urbanas, industriales, comerciales o sistemas eléctricos conectados a la red que no abordaran directamente las necesidades de electrificación de comunidades rurales.
- **Información insuficiente:** Publicaciones que no proporcionaran información suficiente sobre sus objetivos, metodología o resultados para determinar su pertinencia y contribución a las preguntas de investigación.

- **Pertinencia temporal y contextual:** Estudios fuera del período de búsqueda establecido o cuya información no permitiera realizar un análisis pertinente de las condiciones técnicas, regulatorias o sociales consideradas en la revisión.

Clasificación de la literatura complementaria

Con el propósito de contextualizar los resultados sin comprometer la coherencia de los criterios de selección, se estableció una distinción entre los estudios incluidos en la síntesis principal y las fuentes utilizadas como evidencia complementaria.

Las investigaciones desarrolladas en Panamá sobre potencial de recursos renovables, infraestructura eléctrica, integración de sistemas fotovoltaicos o políticas energéticas, que no abordaran directamente la electrificación de comunidades rurales, se clasificaron como literatura contextual nacional.

Por su parte, las publicaciones internacionales relacionadas con experiencias de electrificación rural, sistemas híbridos de generación, modelos de financiamiento y sostenibilidad energética se consideraron literatura complementaria. Estas fuentes no formaron parte de la síntesis principal de estudios elegibles, dado que no cumplían con el criterio geográfico establecido para la revisión. No obstante, se conservaron como antecedentes para contextualizar los resultados obtenidos en Panamá, contrastar experiencias de implementación e identificar desafíos y oportunidades que podrían ser relevantes para el contexto nacional, sin asumir que los resultados observados en otros países son directamente extrapolables a las comunidades rurales panameñas.

2.4. Selección de estudio

El proceso de selección de publicaciones se organizó siguiendo las etapas de identificación, cribado, evaluación de elegibilidad e inclusión contempladas en las directrices PRISMA 2020. La búsqueda bibliográfica se realizó en tres fuentes de información científica: Google Scholar, SciELO e IEEE Xplore.

Durante la etapa de identificación se recuperaron un total de 25 registros, distribuidos de la siguiente manera: 15 de Google Scholar (60 %), 7 de SciELO (28 %) y 3 de IEEE Xplore (12 %). Los registros identificados fueron organizados y gestionados mediante el gestor bibliográfico Zotero. De acuerdo con el registro original del proceso, no se identificaron publicaciones duplicadas.

Posteriormente, se realizó el cribado de los 25 registros identificados mediante la revisión de sus títulos y resúmenes, aplicando los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. Durante esta etapa, se descartaron 10 registros por no cumplir con los criterios de pertinencia temática y geográfica definidos para la revisión. Los 15 registros restantes continuaron a la etapa de evaluación de elegibilidad mediante la revisión de sus textos completos. Tras esta evaluación, se conservaron las 15 publicaciones para el análisis bibliográfico, las cuales fueron clasificadas según su contribución a la investigación, diferenciando los estudios incluidos en la síntesis principal de la literatura contextual nacional e internacional complementaria.

Con el propósito de garantizar la coherencia entre los criterios de selección y el alcance geográfico de la revisión, las publicaciones seleccionadas se diferenciaron según su contribución al estudio. Las investigaciones que abordaban directamente la electrificación de comunidades rurales mediante sistemas solares fotovoltaicos en Panamá se consideraron candidatas para la síntesis principal. Por otra parte, los estudios relacionados con el contexto energético nacional y las investigaciones internacionales se clasificaron como literatura complementaria para apoyar la interpretación y discusión de los resultados.

Las 15 publicaciones consideradas en el análisis bibliográfico se clasificaron según su pertinencia temática y geográfica. De acuerdo con esta clasificación, dos estudios abordaron directamente experiencias de electrificación solar en comunidades rurales de Panamá, cinco proporcionaron antecedentes sobre el contexto energético nacional y ocho correspondieron a literatura internacional complementaria. Esta diferenciación permitió delimitar la evidencia utilizada en la síntesis principal y distinguirla de los antecedentes técnicos, económicos y ambientales empleados para contextualizar e interpretar los hallazgos. La Figura 1 presenta el proceso de identificación y selección de las publicaciones, mientras que la Tabla 1 resume sus principales características y resultados, organizados según las categorías de evidencia establecidas.

2.5. Síntesis y Extracción de Datos

En el proceso de extracción de datos, se abordaron las preguntas de investigación planteadas (1-5) para proporcionar una comprensión detallada del estado actual de la electrificación rural mediante energía solar

fotovoltaica en Panamá. La información extraída incluyó:

- **Barreras y Desafíos en la Implementación (P1):** Se identificaron los principales obstáculos para la implementación de proyectos de energía solar en comunidades rurales de Panamá, tales como los altos costos iniciales, la falta de acceso a financiamiento, los marcos regulatorios y la sostenibilidad técnica, y se analizaron las posibles soluciones para superar estas barreras.[14]
- **Modelos de Implementación de Proyectos (P2):** Se analizaron los diferentes modelos de implementación de proyectos de energía solar en comunidades rurales, considerando factores como la propiedad, la gestión, el financiamiento y la participación comunitaria, y se evaluaron sus resultados y sostenibilidad [10].
- **Sistemas Híbridos con Otras Fuentes de Energía Renovable (P3):** Se exploraron las sinergias entre la energía solar fotovoltaica y otras fuentes de energía renovable disponibles en Panamá, tales como la energía eólica y la biomasa, para crear sistemas híbridos que mejoren la confiabilidad y eficiencia energética en comunidades rurales.
- **Impactos sociales, económicos y ambientales (P4):** Se examinó la evidencia disponible sobre los posibles efectos de la electrificación solar rural en el acceso a servicios básicos, las actividades educativas y productivas, las condiciones económicas de los beneficiarios y la sostenibilidad ambiental. Asimismo, se identificaron las dimensiones para las cuales los estudios no proporcionaron indicadores cuantitativos o mediciones de seguimiento suficientes para establecer impactos atribuibles a la implementación de los sistemas.
- **Investigación y Desarrollo (P5):** Se revisaron estudios sobre estrategias de investigación y desarrollo para la innovación y adaptación de tecnologías solares a las condiciones específicas de las comunidades rurales de Panamá, incluyendo la adaptación tecnológica y el desarrollo de capacidades locales.

Este enfoque permitió una extracción de datos clara y específica que aborda cada pregunta de investigación, proporcionando respuestas detalladas sobre los desafíos, oportunidades e impactos de la electrificación rural mediante energía solar fotovoltaica en Panamá.

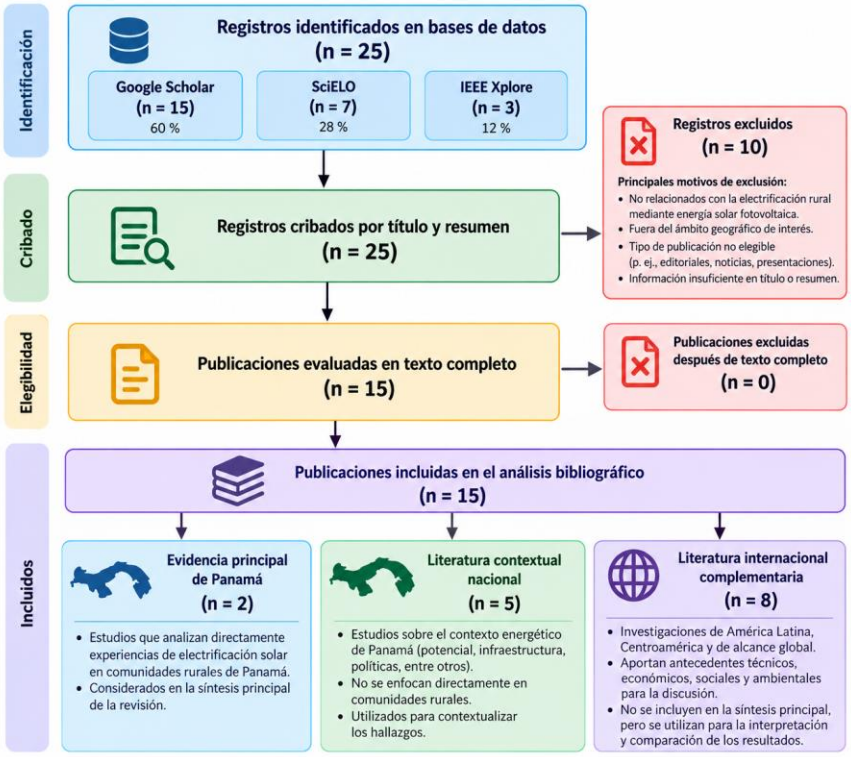


Figura 1. *Diagrama de flujo de la metodología PRISMA.*

2.6. Limitaciones y Riesgo de Sesgo

La calidad metodológica de los estudios incluidos en la síntesis principal se valoró mediante un análisis cualitativo que consideró cinco criterios: claridad de los objetivos de investigación, descripción del contexto y la población estudiada, adecuación de los procedimientos metodológicos, respaldo de los resultados en la evidencia recopilada e identificación de las limitaciones de cada estudio. Debido a las diferencias en los diseños y enfoques metodológicos de las investigaciones seleccionadas, se realizó una valoración descriptiva, sin aplicar una puntuación cuantitativa uniforme.

El estudio de Madriz-Vargas et al. [1] presentó una metodología sustentada en visitas de campo, entrevistas semiestructuradas y evaluaciones técnicas de un sistema híbrido solar-eólico implementado en la comunidad de Boca de Lurá. Sus resultados proporcionan evidencia sobre el funcionamiento del sistema y los factores organizativos, legales y financieros que condicionan su sostenibilidad. Sin embargo, los autores reconocen la ausencia de registros históricos completos de generación eléctrica, lo que limita la evaluación cuantitativa del desempeño energético a largo plazo.

Por su parte, Jiménez et al. [2] desarrollaron una investigación cualitativa, descriptiva y transversal, basada en entrevistas a diez moradores de la comunidad de Loma Muleto, provincia de Bocas del Toro, complementada con una experiencia de instalación fotovoltaica en una vivienda. Aunque el estudio permite identificar necesidades relacionadas con la educación, la salud y la economía, así como percepciones de los habitantes sobre el acceso a la electricidad, no presenta mediciones de seguimiento suficientes para determinar cuantitativamente los impactos sociales y económicos derivados de la instalación.

Adicionalmente, esta revisión presenta limitaciones y posibles fuentes de sesgo que deben considerarse al interpretar sus resultados. Una de ellas corresponde a la delimitación temporal de las publicaciones, establecida entre enero de 2013 y septiembre de 2023, lo que pudo excluir investigaciones anteriores o posteriores que conservaran relevancia para el estudio de la electrificación solar rural en Panamá.

Otra posible fuente de sesgo se relaciona con la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión durante el proceso de selección. Aunque se establecieron criterios para orientar la identificación de publicaciones pertinentes, su interpretación pudo introducir cierto grado de subjetividad, particularmente al determinar la relación directa de los estudios con la electrificación rural en el contexto panameño.

Asimismo, la búsqueda bibliográfica se restringió a tres fuentes de información: Google Scholar, SciELO e IEEE Xplore. Esta delimitación pudo reducir la exhaustividad de la revisión al dejar fuera publicaciones disponibles en otras bases de datos, repositorios institucionales o fuentes de literatura técnica.

Finalmente, la limitada cantidad de estudios directamente relacionados con experiencias de electrificación solar rural en Panamá, junto con la heterogeneidad de sus enfoques metodológicos y la ausencia de indicadores comparables, restringe la posibilidad de realizar una síntesis cuantitativa y generalizar los resultados a otras comunidades del país.

En consecuencia, los hallazgos de esta revisión deben interpretarse considerando tanto la calidad y el alcance de la evidencia disponible como las limitaciones inherentes al proceso de búsqueda y selección bibliográfica. Estas consideraciones permiten delimitar la solidez de las conclusiones e identificar necesidades de investigación futura sobre el desempeño técnico, la sostenibilidad y los impactos socioeconómicos de los sistemas solares fotovoltaicos en comunidades rurales panameñas.

3. Resultados y Discusión

Como resultado del proceso de selección bibliográfica, se consideraron 15 publicaciones relacionadas con la energía solar fotovoltaica, la electrificación rural y el aprovechamiento de fuentes renovables. Con el propósito de establecer una correspondencia clara entre el objetivo de la revisión y la evidencia disponible, las publicaciones se organizaron en tres categorías: estudios directamente relacionados con la electrificación solar de comunidades rurales en Panamá, investigaciones nacionales que aportan información contextual sobre el sector energético y publicaciones internacionales utilizadas como literatura complementaria.

La Tabla 1 presenta las características de las publicaciones analizadas, incluyendo su ámbito geográfico, objeto de evaluación y principales resultados o contribuciones. Esta clasificación permite distinguir la evidencia directamente relacionada con las comunidades rurales panameñas de los antecedentes utilizados para contextualizar y contrastar los hallazgos, evitando extrapolar al contexto nacional resultados obtenidos en otros países o en aplicaciones energéticas diferentes.

En consecuencia, el análisis de los resultados se fundamenta principalmente en los estudios desarrollados en las comunidades de Boca de Lurá y Loma Muleto [1], [2], que constituyen la evidencia directamente relacionada con la electrificación solar rural en Panamá. Las investigaciones nacionales sobre potencial energético, diseño de sistemas fotovoltaicos y condiciones del sector eléctrico [3]–[7] se consideran antecedentes contextuales. Por su parte, las publicaciones internacionales [8]–[15] se utilizan exclusivamente para contextualizar y contrastar los hallazgos e identificar aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales que requieren mayor investigación en el contexto panameño.

A partir de esta clasificación, los resultados y la discusión se organizan en función de las cinco preguntas de investigación planteadas en la sección 2.1. Se examinan las barreras y desafíos para la electrificación solar rural, los modelos de implementación y gestión, la integración de sistemas híbridos, los impactos sociales, económicos y ambientales, y las necesidades de investigación y desarrollo. Para cada dimensión se distinguen los hallazgos documentados en Panamá, los aportes de la literatura complementaria y las implicaciones derivadas del análisis, considerando las limitaciones de la evidencia disponible.

3.1. Barreras y desafíos para la electrificación solar rural en Panamá

La evidencia analizada permite identificar barreras técnicas, organizativas, económicas y sociales que condicionan la implementación y sostenibilidad de los proyectos de electrificación solar en comunidades rurales panameñas. Estas barreras se manifiestan de manera diferente según las características de las comunidades, el alcance de las instalaciones y los mecanismos de gestión establecidos.

Madriz-Vargas et al. [1] evaluaron la sostenibilidad de un sistema híbrido solar-eólico con almacenamiento mediante baterías, instalado en la comunidad de Boca de Lurá, provincia de Coclé. Aunque el sistema proporcionó suministro eléctrico a una escuela rural durante aproximadamente seis años, los autores identificaron dificultades asociadas con la distribución de responsabilidades institucionales, la ausencia de mecanismos de financiamiento para el mantenimiento y la dependencia de asistencia técnica externa. Asimismo, señalaron que la limitada capacitación de los habitantes para realizar actividades especializadas de operación y mantenimiento representaba un desafío para la sostenibilidad del proyecto.

Por su parte, Jiménez et al. [2] estudiaron las necesidades de electrificación de la comunidad de Loma Muleto, provincia de Bocas del Toro. Mediante entrevistas a diez moradores, identificaron dificultades relacionadas con la ausencia de electricidad y sus consecuencias para las actividades educativas, la atención de necesidades de salud y la economía doméstica. La investigación también documentó la instalación de un sistema fotovoltaico en una vivienda, aunque no desarrolló una evaluación de seguimiento que permitiera establecer su sostenibilidad técnica y económica a largo plazo.

En conjunto, los estudios muestran que las dificultades de electrificación rural no se limitan a la disponibilidad de tecnología. La experiencia de Boca de Lurá evidencia la importancia de establecer responsabilidades claras para la operación y el mantenimiento, fortalecer las capacidades locales y prever recursos económicos para la reposición de componentes. Por su parte, el caso de Loma Muleto destaca la necesidad de considerar las condiciones sociales y las necesidades energéticas de los habitantes durante la planificación de las soluciones.

A partir de estos hallazgos, se identifican como posibles líneas de acción el establecimiento de mecanismos de gestión comunitaria, la capacitación técnica de los beneficiarios, la planificación de fondos para mantenimiento y la evaluación de las necesidades particulares de cada comunidad. Estas medidas constituyen recomendaciones derivadas del análisis de la evidencia y no deben interpretarse como soluciones

cuya efectividad haya sido demostrada de manera generalizada en el contexto panameño.

3.2. Modelos de implementación y gestión de proyectos de electrificación solar rural

La revisión de la literatura permitió identificar diferentes escalas de implementación de sistemas solares fotovoltaicos y factores que influyen en su gestión y sostenibilidad. En Panamá, las experiencias documentadas comprenden instalaciones destinadas al uso comunitario y doméstico, mientras que los antecedentes nacionales e internacionales aportan elementos adicionales para analizar las condiciones técnicas, económicas e institucionales que intervienen en estos proyectos.

Madriz-Vargas et al. [1] evaluaron un sistema híbrido solar-eólico con almacenamiento mediante baterías, instalado para suministrar electricidad a una escuela de la comunidad de Boca de Lurá, provincia de Coclé. La investigación evidenció que la sostenibilidad del sistema no dependía únicamente de su funcionamiento técnico, sino también de la organización comunitaria, la asignación de responsabilidades institucionales y la disponibilidad de recursos para operación y mantenimiento. Los autores identificaron dificultades relacionadas con la ausencia de mecanismos financieros permanentes y la dependencia de asistencia técnica externa, lo que representa un riesgo para la continuidad del servicio.

En contraste, Jiménez et al. [2] documentaron una experiencia de instalación fotovoltaica en una vivienda de la comunidad de Loma Muleto, provincia de Bocas del Toro. Esta aplicación de escala doméstica permitió atender necesidades energéticas de una unidad familiar y recoger percepciones de sus beneficiarios. Sin embargo, la investigación no desarrolló una evaluación integral de los mecanismos de propiedad, financiamiento y mantenimiento, por lo que no es posible establecer su sostenibilidad económica y operativa a largo plazo.

Los antecedentes nacionales complementarios permiten ampliar el análisis de las condiciones que deben considerarse al seleccionar un modelo de implementación. Barrera [3] examinó el potencial eólico y fotovoltaico en localidades panameñas, aportando información sobre la disponibilidad de recursos energéticos y la posibilidad de considerar soluciones híbridas. Por su parte, Castells [5] estudió el potencial de fuentes renovables en el archipiélago de Las Perlas y destacó la necesidad de caracterizar las condiciones energéticas locales mediante evaluaciones de campo. Aunque estas investigaciones no comparan directamente modelos de gestión comunitaria, sus aportes permiten reconocer la importancia de adaptar las soluciones tecnológicas a las características geográficas y energéticas de cada localidad.

Desde una perspectiva sectorial, el informe de IRENA [6] proporciona antecedentes sobre las condiciones de desarrollo de las energías renovables en Panamá. Asimismo, Marín-Jiménez [4] presenta consideraciones técnicas relacionadas con el diseño de proyectos fotovoltaicos de mayor escala. Si bien estos antecedentes no evalúan directamente la electrificación de viviendas rurales aisladas, contribuyen a contextualizar los aspectos de planificación e infraestructura que deben diferenciarse de los mecanismos de gestión comunitaria.

En el ámbito internacional, los antecedentes del Banco Interamericano de Desarrollo [10] y el trabajo de Ley [15] proporcionan elementos complementarios para examinar el aprovechamiento de las energías renovables en América Latina y Centroamérica, respectivamente. Estas publicaciones permiten contextualizar las dimensiones institucionales, sociales y de sostenibilidad relacionadas con la implementación de soluciones energéticas, sin constituir evidencia directa sobre la efectividad de los modelos de electrificación solar rural en Panamá. De manera similar, el informe del Banco Mundial [11] sobre el mercado de sistemas solares fuera de la red permite contextualizar las alternativas de electrificación descentralizada y sus condiciones de desarrollo. No obstante, los resultados internacionales no constituyen evidencia directa de la efectividad de estos modelos en Panamá.

En conjunto, la evidencia revisada permite distinguir experiencias comunitarias y domésticas de electrificación solar, así como identificar factores relevantes para su implementación: adecuación de la tecnología a la demanda energética, definición de responsabilidades de gestión, disponibilidad de financiamiento para mantenimiento, capacitación local y participación de los beneficiarios. La experiencia de Boca de Lurá aporta evidencia particularmente relevante sobre las dificultades de sostenibilidad institucional y

operativa, mientras que Loma Muleto documenta una aplicación doméstica cuyo desempeño a largo plazo requiere mayor evaluación.

Por tanto, aunque la literatura permite identificar elementos que deberían considerarse en el diseño de proyectos de electrificación solar rural, no se dispone de estudios comparativos suficientes para determinar qué modelo de propiedad, financiamiento o gestión resulta más efectivo en las comunidades rurales de Panamá. Esta limitación evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones que comparen diferentes esquemas de implementación mediante indicadores técnicos, económicos y sociales, considerando las particularidades de cada comunidad.

3.3. Integración de sistemas solares fotovoltaicos con otras fuentes de energía renovable

La integración de sistemas solares fotovoltaicos con otras fuentes de energía renovable constituye una alternativa tecnológica para atender necesidades de electrificación en comunidades rurales alejadas de las redes convencionales. Estas configuraciones, conocidas como sistemas híbridos, pueden combinar generación fotovoltaica, energía eólica y almacenamiento mediante baterías, con el propósito de aprovechar la complementariedad de los recursos energéticos y contribuir a la continuidad del suministro eléctrico.

En Panamá, Madriz-Vargas et al. [1] documentaron la implementación y evaluación de un sistema híbrido solar-eólico con almacenamiento mediante baterías en la comunidad de Boca de Lurá, provincia de Coclé. El sistema contaba con una capacidad instalada de 2,17 kW, integrada por 1,17 kWp de generación fotovoltaica y 1 kW de generación eólica, además de un banco de baterías para el almacenamiento energético. La instalación permitió suministrar electricidad a una escuela rural utilizada también como espacio comunitario.

Los resultados del estudio evidenciaron que el sistema había proporcionado suministro eléctrico durante aproximadamente seis años. Asimismo, se documentó una interrupción prolongada del funcionamiento del aerogenerador, durante la cual la generación fotovoltaica continuó abasteciendo las necesidades eléctricas de la instalación. Esta experiencia demuestra la capacidad del componente solar para mantener el suministro durante una falla del componente eólico bajo las condiciones de demanda observadas. Sin embargo, la ausencia de registros históricos completos de generación y almacenamiento impide cuantificar la contribución individual de cada fuente o determinar mejoras en eficiencia energética atribuibles a la configuración híbrida.

En cuanto a los antecedentes nacionales complementarios, Barrera [3] examinó el potencial eólico y fotovoltaico en localidades panameñas, entre ellas Chichica, Las Minas y El Retiro, identificando condiciones que podrían favorecer el aprovechamiento combinado de ambos recursos. Por su parte, Castells [5] estudió el potencial de energías renovables en el archipiélago de Las Perlas, destacando la importancia de realizar evaluaciones de campo para caracterizar los recursos energéticos disponibles. Estos antecedentes permiten reconocer oportunidades para el desarrollo de sistemas híbridos en diferentes regiones del país, aunque no constituyen evidencia de su desempeño operativo en comunidades rurales electrificadas.

Otras investigaciones aportan elementos técnicos relacionados con la integración de tecnologías solares. Quijano [7] analizó los efectos de la penetración fotovoltaica mediante autoconsumo sobre los niveles de tensión en una red de distribución adaptada al contexto panameño. Aunque su estudio no corresponde a un sistema híbrido aislado, evidencia la importancia de considerar las condiciones eléctricas y operativas durante la integración de generación fotovoltaica. En el ámbito internacional, Cabezas-Maslanczuk [8] examinó una configuración que combina aprovechamiento fotovoltaico y térmico, mientras que Roy et al. [13] aborda desarrollos tecnológicos relacionados con sistemas híbridos solar-eólicos. Estas investigaciones constituyen antecedentes complementarios sobre integración energética, sin proporcionar evidencia directa de su efectividad en las comunidades rurales panameñas analizadas.

En conjunto, los estudios revisados permiten identificar la combinación solar-eólica con almacenamiento como una configuración técnicamente implementada en el contexto rural panameño. La experiencia de Boca de Lurá evidencia la posibilidad de mantener el suministro mediante el componente fotovoltaico durante una interrupción de la generación eólica. No obstante, la literatura disponible no permite determinar cuantitativamente si los sistemas híbridos

ofrecen mayor eficiencia, confiabilidad o rentabilidad que las instalaciones exclusivamente fotovoltaicas en las comunidades rurales de Panamá.

Por consiguiente, se identifica la necesidad de desarrollar investigaciones que comparen configuraciones fotovoltaicas e híbridas mediante indicadores de generación, disponibilidad del servicio, comportamiento del almacenamiento, costos de operación y mantenimiento y demanda energética de los usuarios. Asimismo, la selección de las fuentes renovables debería sustentarse en la caracterización de los recursos locales y en las condiciones particulares de cada comunidad, evitando asumir que una misma configuración tecnológica resulta adecuada para todos los entornos rurales del país.

3.4. Impactos sociales, económicos y ambientales de la electrificación solar rural

La electrificación mediante sistemas solares fotovoltaicos puede contribuir al mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades rurales que carecen de acceso a la red eléctrica convencional. Sin embargo, la magnitud de sus impactos sociales, económicos y ambientales depende de las características de cada proyecto, las necesidades de los beneficiarios y las condiciones de operación y mantenimiento. En Panamá, la evidencia identificada permite examinar algunas experiencias de implementación, aunque presenta limitaciones para cuantificar sus efectos a largo plazo.

Desde la dimensión social, Jiménez et al. [2] identificaron en la comunidad de Loma Muleto necesidades relacionadas con el acceso a electricidad para actividades educativas, atención de necesidades de salud y actividades domésticas. La investigación también documentó la instalación de un sistema fotovoltaico en una vivienda y recogió percepciones favorables de sus beneficiarios. No obstante, debido a su enfoque cualitativo y a la ausencia de mediciones de seguimiento, los resultados no permiten establecer mejoras cuantificables en indicadores educativos, sanitarios o de calidad de vida atribuibles a la instalación.

Por su parte, Madriz-Vargas et al. [1] analizaron un sistema híbrido solar-eólico que suministraba electricidad a una escuela rural de Boca de Lurá, utilizada también como espacio comunitario. La experiencia documentó la disponibilidad de suministro eléctrico para esta infraestructura y permitió identificar factores sociales y organizativos que condicionaban su sostenibilidad. Entre ellos destacaron la participación de los actores involucrados, la distribución de responsabilidades y la disponibilidad de capacidades locales para apoyar la operación y el mantenimiento. Sin embargo, el estudio no desarrolló una evaluación longitudinal de indicadores sociales que permitiera cuantificar los cambios producidos por el acceso a la electricidad.

En la dimensión económica, las investigaciones nacionales evidencian la importancia de considerar los recursos necesarios para garantizar la continuidad de las instalaciones. En Boca de Lurá [1], la ausencia de mecanismos financieros permanentes para operación y mantenimiento constituyó una limitación relevante para la sostenibilidad del sistema. En Loma Muleto [2], se documentó una experiencia de instalación doméstica, pero no se presentaron datos de seguimiento suficientes para determinar de manera concluyente su rentabilidad o los ahorros económicos efectivamente obtenidos por los beneficiarios.

La literatura internacional sobre electrificación descentralizada y energías renovables en comunidades [10], [11], [15] proporciona un contexto complementario para examinar los posibles beneficios económicos de estas tecnologías. Sin embargo, la información disponible en los estudios panameños no permite establecer reducciones generalizables del gasto energético, incrementos en los ingresos familiares o generación de empleo como efectos comprobados de la electrificación solar rural.

Desde la perspectiva ambiental, los sistemas fotovoltaicos representan una alternativa de generación eléctrica basada en recursos renovables. Los antecedentes sobre transición energética en Panamá [6] y las publicaciones internacionales relacionadas con energías renovables y cambio climático [9], [12] permiten contextualizar su posible contribución a la reducción de la dependencia de fuentes convencionales de energía. No obstante, los estudios de Boca de Lurá y Loma Muleto no presentan evaluaciones completas de emisiones evitadas, impactos del ciclo de vida o gestión de residuos asociados con los equipos y sistemas de almacenamiento utilizados.

Asimismo, la literatura complementaria sobre desafíos de electrificación rural [14] permite situar la sostenibilidad de los proyectos dentro de una problemática más amplia que comprende aspectos tecnológicos, económicos y sociales. Su aplicación al contexto panameño requiere considerar las condiciones particulares de las comunidades y la disponibilidad de mecanismos para garantizar la continuidad de los servicios energéticos.

En conjunto, la evidencia revisada permite reconocer beneficios inmediatos relacionados con la disponibilidad de electricidad y la atención de determinadas necesidades comunitarias y domésticas. Sin embargo, no resulta suficiente para cuantificar de manera generalizable los impactos sociales, económicos y ambientales de la electrificación solar rural en Panamá.

A partir de estas limitaciones, se considera necesario incorporar en futuras implementaciones mecanismos de evaluación que permitan medir cambios en el acceso a servicios educativos y sanitarios, actividades productivas, gastos energéticos y condiciones ambientales. De igual manera, la planificación de los proyectos debería contemplar capacitación local, financiamiento para mantenimiento y estrategias de gestión de componentes al finalizar su vida útil. Estas medidas constituyen recomendaciones derivadas del análisis y requieren validación mediante investigaciones específicas en comunidades rurales panameñas.

3.5. Necesidades de investigación y desarrollo para la electrificación solar rural en Panamá

El análisis de la literatura permitió identificar necesidades de investigación y desarrollo relacionadas con la adaptación tecnológica, la evaluación del desempeño energético, la sostenibilidad económica y la participación comunitaria en proyectos de electrificación solar rural en Panamá. Estas necesidades se derivan tanto de las limitaciones de los estudios nacionales como de los antecedentes técnicos y sectoriales incluidos en la revisión.

Una primera línea de investigación corresponde a la caracterización de los recursos energéticos y la demanda eléctrica de las comunidades rurales. Los estudios de Barrera [3] y Castells [5] aportan antecedentes sobre el potencial de aprovechamiento de fuentes renovables en diferentes localidades panameñas, pero también evidencian la importancia de contar con información específica de campo. En este sentido, se considera necesario desarrollar evaluaciones que integren mediciones de irradiación solar, disponibilidad de recursos complementarios, perfiles de consumo y variaciones estacionales de la demanda, con el propósito de orientar la selección y el dimensionamiento de los sistemas energéticos.

Una segunda necesidad se relaciona con el seguimiento técnico de las instalaciones fotovoltaicas e híbridas. Madriz-Vargas et al. [1] documentaron el funcionamiento de un sistema solar-eólico en Boca de Lurá, pero la ausencia de registros históricos completos de generación limitó la evaluación cuantitativa de su desempeño a largo plazo. Por tanto, futuras investigaciones deberían incorporar sistemas de monitoreo que permitan registrar generación eléctrica, consumo, estado de carga de las baterías, interrupciones del servicio y requerimientos de mantenimiento. Esta información facilitaría la comparación de diferentes configuraciones tecnológicas y la identificación de factores asociados con su confiabilidad.

La integración y adaptación de tecnologías también representa una oportunidad de investigación. Los antecedentes de Marín-Jiménez [4] y Quijano [7] aportan elementos técnicos sobre el diseño de instalaciones fotovoltaicas y su interacción con sistemas eléctricos en Panamá, mientras que Cabezas-Maslanczuk [8] presenta una experiencia internacional de aprovechamiento combinado de energía solar fotovoltaica y térmica. Asimismo, la literatura complementaria sobre sistemas híbridos [13] permite identificar alternativas tecnológicas que podrían ser objeto de evaluación. Sin embargo, su aplicabilidad a comunidades rurales aisladas requiere investigaciones específicas que consideren las condiciones ambientales, los recursos disponibles y las necesidades energéticas locales.

Otra línea prioritaria corresponde a la evaluación de los impactos sociales y económicos de la electrificación. Jiménez et al. [2] documentaron necesidades energéticas y percepciones de habitantes de Loma Muleto, pero no desarrollaron un seguimiento longitudinal que permitiera cuantificar los cambios posteriores a la instalación fotovoltaica. En consecuencia, se requieren estudios que incorporen indicadores medibles sobre acceso a servicios, actividades educativas, usos

productivos de la electricidad, gastos familiares y satisfacción de los beneficiarios, mediante evaluaciones realizadas antes y después de la implementación.

La sostenibilidad institucional y financiera constituye igualmente un campo de investigación relevante. La experiencia de Boca de Lurá [1] mostró dificultades relacionadas con la distribución de responsabilidades, la disponibilidad de recursos para mantenimiento y la dependencia de asistencia técnica externa. Los antecedentes internacionales sobre energías renovables comunitarias y sistemas solares descentralizados [10], [11], [15] proporcionan un contexto para examinar alternativas de gestión y financiamiento. No obstante, resulta necesario evaluar su viabilidad en Panamá mediante estudios comparativos que consideren costos de inversión, reposición de componentes, capacidades locales y mecanismos de participación comunitaria.

Finalmente, desde la perspectiva ambiental, los antecedentes nacionales y regionales sobre transición energética [6], [9], así como la literatura internacional sobre cambio climático [12], permiten situar la electrificación solar dentro de los esfuerzos de aprovechamiento de fuentes renovables. Sin embargo, los estudios nacionales analizados no presentan evaluaciones completas del ciclo de vida de los sistemas instalados. Por ello, se propone investigar los impactos asociados con la fabricación, operación, mantenimiento y disposición final de paneles, baterías y otros componentes, considerando las condiciones de las comunidades rurales panameñas.

Finalmente, las principales necesidades de investigación identificadas comprenden la caracterización de recursos y demanda energética, el monitoreo del desempeño de los sistemas, la adaptación de tecnologías fotovoltaicas e híbridas, la medición de impactos socioeconómicos, la evaluación de modelos de gestión y financiamiento y el análisis de la sostenibilidad ambiental. Estas líneas constituyen una agenda de investigación derivada de los vacíos observados en la literatura revisada y requieren validación mediante estudios de campo y evaluaciones comparativas en diferentes comunidades rurales de Panamá.

Tabla 1. Caracterización de las publicaciones seleccionadas según su ámbito de aplicación y contribución a la revisión. *

A. Evidencia principal: electrificación solar rural en Panamá

Año	Primer autor	Objeto de evaluación	Entorno	Principales resultados
2017	Madriz-Vargas [1]	Sostenibilidad de un sistema híbrido solar-eólico en Boca de Lurá.	Comunidad rural panameña fuera de la red eléctrica.	Se reportó suministro eléctrico a una escuela rural durante aproximadamente seis años, con interrupción del componente eólico y continuidad del suministro fotovoltaico. Se identificaron desafíos legales, organizativos y presupuestarios relacionados con la sostenibilidad del sistema.
2019	Jiménez [2]	Aprovechamiento de energía solar para mejorar las condiciones sociales en Loma Muleto.	Comunidad rural de Bocas del Toro sin acceso a la red eléctrica.	Se documentó la instalación de un panel solar en una vivienda para evaluar sus posibles beneficios. La información resumida no permite establecer resultados cuantitativos.

B. Literatura contextual nacional: estudios energéticos desarrollados en Panamá

Año	Primer autor	Objeto de evaluación	Entorno	Principales resultados
2017	Barrera [3]	Potencial eólico y fotovoltaico en regiones secas de Panamá.	Chichica, Las Minas y El Retiro.	Se identificaron zonas con potencial para sistemas híbridos. Se recomendó realizar validaciones en campo y considerar la participación comunitaria.
2020	Marín-Jiménez [4]	Aspectos técnicos del diseño de parques solares fotovoltaicos.	Proyectos fotovoltaicos en Panamá.	Se reportaron parámetros de referencia para proyectos de 20 MW, incluyendo costos y requerimientos de superficie.
2017	Castells [5]	Potencial energético renovable e impacto ambiental.	Isla de Saboga, archipiélago de Las Perlas.	Se identificó la necesidad de realizar estudios de campo para caracterizar el potencial energético disponible.
2018	IRENA [6]	Preparación de Panamá para la transición energética.	Sector energético nacional.	Proporciona información sobre el contexto de las energías renovables en Panamá, sin resultados específicos de electrificación rural en el resumen disponible.

2022	Quijano [7]	Efectos de la penetración fotovoltaica mediante autoconsumo.	Modelo de red de distribución adaptado a Panamá.	Se identificaron posibles variaciones en los niveles de tensión asociadas con la integración fotovoltaica. Se recomendó validar los resultados en circuitos reales.

C. Literatura internacional complementaria

Año	Autor o entidad consignada	Objeto de evaluación	Ámbito	Contribución al análisis
2018	Cabezas-Maslanczuk [8]	Sistema combinado fotovoltaico y térmico.	Argentina	Aporta antecedentes experimentales sobre tecnologías solares combinadas.
2016	IRENA [9]	Mercado de energías renovables.	América Latina	Contextualiza tendencias regionales del sector renovable.
2018	Barnes et al. [10]	Evaluación de los beneficios y desafíos del acceso a energía sostenible en América Latina y el Caribe.	América Latina	Proporciona antecedentes sobre proyectos comunitarios.
2020	World Bank Group y GOGLA [11]	Mercado solar fuera de la red.	Global	Contextualiza las tendencias de sistemas solares aislados.
2022	IPCC [12]	Evaluación de estrategias de mitigación del cambio climático, incluyendo la contribución de las energías renovables.	Global	Aporta antecedentes sobre la dimensión ambiental.
2022	Roy et al. [13]	Revisión de avances en sistemas híbridos de generación solar-eólica.	Global	Presenta antecedentes sobre innovación tecnológica en sistemas híbridos.
2019	Almeshqab y Ustun [14]	Lecciones de iniciativas de electrificación rural en países en desarrollo, considerando factores técnicos, sociales, financieros y de políticas públicas.	Países en desarrollo	Contextualiza desafíos de implementación.
2017	Ley [15]	Desarrollo sostenible, cambio climático y energías renovables en comunidades rurales de Centroamérica.	Centroamérica	Proporciona antecedentes regionales sobre experiencias comunitarias.

*La evidencia principal corresponde a estudios directamente relacionados con experiencias de electrificación solar en comunidades rurales de Panamá. La literatura contextual nacional y la literatura internacional complementaria se incorporaron exclusivamente como antecedentes para contextualizar y discutir los hallazgos, sin formar parte de la síntesis principal de la revisión

4. Conclusión

La presente revisión permitió analizar la evidencia disponible sobre la implementación de sistemas solares fotovoltaicos para la electrificación de comunidades rurales en Panamá, considerando sus principales desafíos, modelos de implementación, alternativas tecnológicas, impactos y necesidades de investigación. De las 15 publicaciones examinadas, dos documentaron directamente experiencias de electrificación solar rural en el país, mientras que las restantes proporcionaron antecedentes nacionales e internacionales complementarios.

En relación con las barreras de implementación, se identificó que la sostenibilidad de estos proyectos depende no solo de las características técnicas de los sistemas, sino también de factores organizativos, financieros e institucionales. La experiencia de Boca de Lurá evidenció dificultades relacionadas con el mantenimiento, la distribución de responsabilidades y la disponibilidad de capacidades técnicas locales, mientras que el estudio de Loma Muleto permitió reconocer necesidades energéticas y sociales de comunidades sin acceso a la red eléctrica.

Respecto a los modelos de implementación, se identificaron experiencias de electrificación destinadas a infraestructura comunitaria y a viviendas particulares. Sin embargo, la evidencia disponible no permite determinar cuál modelo de propiedad, gestión o financiamiento resulta más efectivo en el contexto rural panameño, debido a la ausencia de evaluaciones comparativas y de seguimiento a largo plazo.

En cuanto a la integración de fuentes renovables, el sistema híbrido solar-eólico de Boca de Lurá constituye una experiencia relevante de aplicación tecnológica. No obstante, la falta de registros históricos completos de generación y almacenamiento limita la posibilidad de cuantificar las ventajas de esta configuración frente a sistemas exclusivamente fotovoltaicos.

Desde las dimensiones social, económica y ambiental, los estudios nacionales documentan la

disponibilidad de electricidad para determinados usos comunitarios y domésticos, así como necesidades y percepciones de los beneficiarios. Sin embargo, no proporcionan indicadores suficientes para establecer mejoras cuantificables y generalizables en educación, salud, ingresos familiares o reducción de emisiones.

Finalmente, se identificaron necesidades de investigación relacionadas con la caracterización de recursos energéticos, el monitoreo del desempeño de las instalaciones, la comparación de configuraciones tecnológicas, la evaluación de modelos de gestión y financiamiento y la medición longitudinal de impactos socioeconómicos y ambientales.

En síntesis, los resultados muestran que la electrificación solar constituye una alternativa tecnológica implementada en comunidades rurales panameñas, pero que la evidencia científica disponible continúa siendo limitada. Por ello, se requieren investigaciones de campo con indicadores verificables y períodos de seguimiento adecuados que permitan fortalecer la toma de decisiones y orientar el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y adaptadas a las condiciones de las comunidades rurales de Panamá.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores contribueron con la investigación, la conceptualización y la revisión sistemática, realizando el análisis de datos y la redacción del manuscrito. M. A. y L. A. contribuyeron en la recopilación de datos, , E. C. Y.S. con el análisis de casos y la corrección del manuscrito. E. C. y Y.S. Todos los autores aprueban la versión final del manuscrito y se responsabilizan de la integridad del trabajo.

REFERENCIAS

[1] R. Madriz-Vargas, A. Bruce, M. Watt, L. G. Mogollón, and H. R. Álvarez, "Community renewable energy in Panama: A sustainability assessment of the 'Boca de Lura' PV-Wind-Battery hybrid power system," Renewable Energy and Environmental Sustainability, vol. 2, art. no. 18, 2017, doi: 10.1051/rees/2017040.

[2] T. Jiménez, L. Silva, M. Fernández, and V. Valdés, "Aprovechamiento de la energía solar para mejorar las condiciones sociales de la comunidad de Loma Muleto, Bocas del Toro," Revista de Iniciación Científica, vol. 5, no. 1, pp. 26–33, 2019, doi: 10.33412/rev-ric.v5.1.2227.

[3] L. Barrera, E. Cortés, M. Méndez, J. Mendoza, and V. Domínguez, "Energías no convencionales: eólica y fotovoltaica aplicadas a las regiones secas de Panamá," Revista de Iniciación Científica, vol. 3, pp. 56–63, 2017. [Online]. Available: https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/1455

[4] J. Marín-Jiménez and P. González-Cruz, "Lecciones aprendidas del diseño de parques solares fotovoltaicos: Un enfoque de las características técnicas," I+D Tecnológico, vol. 16, no. 1, pp. 54–60, 2020, doi: 10.33412/idt.v16.1.2440.

[5] M. Castells-Sanabra, A. Martínez Parera, A. Mujal-Colilles, and M. López, "Estudio del potencial energético de las energías renovables y su impacto en el archipiélago de las Perlas (Panamá). Primeras aproximaciones," I+D+i Marítima, Revista Científica de la Universidad Internacional Marítima de Panamá, vol. 3, no. 1, pp. 23–28, 2017.

[6] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewables Readiness Assessment: Panama. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IRENA, 2018.

[7] M. Quijano and G. González, "Study of the penetration of photovoltaic energy at the self-consumption customer level using the IEEE 13-node test feeder adapted to Panama," in Proc. 2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN), Panama City, Panama, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/CONCAPAN48024.2022.9997607.

[8] M. D. Cabezas-Maslanczuk, J. I. Franco-Brazes, and H. J. Fasoli-Tolosa, "Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica," Ingeniería, Investigación y Tecnología, vol. 19, no. 2, pp. 209–221, 2018.

[9] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Energy Market Analysis: Latin America. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IRENA, 2016.

[10] D. F. Barnes, H. Samad, and S. Rivas, Meeting Challenges, Measuring Progress: The Benefits of Sustainable Energy Access in Latin America and the Caribbean. Inter-American Development Bank, 2018, doi: 10.18235/0001407.

[11] World Bank Group and Global Off-Grid Lighting Association (GOGLA), Off-Grid Solar Market Trends Report 2020, 2020.

[12] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2022.

[13] P. Roy, J. He, T. Zhao, and Y. V. Singh, "Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review," IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 3, pp. 81–104, 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093.

[14] F. Almeshqab and T. S. Ustun, "Lessons learned from rural electrification initiatives in developing countries: Insights for technical, social, financial and public policy aspects," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 102, pp. 35–53, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.035.

[15] D. Ley, "Sustainable development, climate change, and renewable energy in rural Central America," in Evaluating Climate Change Action for Sustainable Development, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017, pp. 187–212.