

Systematic Review on the implementation of photovoltaic systems in rural areas without electrical services in Latin America

Flavio Luis Celinny Carpio-Terrazos¹; Christel Lucero Choque-Yarasca²; Esther Orielle Castillo-Siguas³; Bruno Gimenez-Lopez⁴; Lucy Veronica Godoy-Laurente⁵
^{1,2,3,4,5} Universidad tecnológica del Perú, Perú, U19211024@utp.edu.pe, C20242@utp.edu.pe, C20906@utp.edu.pe, C27313@utp.edu.pe, c20407@utp.edu.pe

Abstract- *The study aims to examine the impact of photovoltaic systems in rural areas without access to electricity in Latin America. This will provide a basis for informed decisions and effective policies to promote sustainable development in the region. A systematic literature review was conducted using the PICOC strategy to formulate questions on quality of life, environmental impact, economic benefits and sustainable development. Databases such as Scopus were used and rigorous inclusion and exclusion criteria were applied. The selection process followed the PRISMA methodology to ensure completeness and objectivity. The results showed that more studies on photovoltaic systems were published between 2020 and 2024. Brazil is the leading country in terms of number of research studies, followed by Colombia, Bolivia, Ecuador, Argentina, Mexico and Peru. The results show that solar energy has enabled the expansion of energy coverage, reduced carbon emissions and fostered economic development by boosting agricultural, commercial and tourism activities. In addition, it was identified that, although the initial investment in solar panels remains a barrier, the operational and maintenance costs are significantly lower in the long term. However, the need for affordable financing strategies, recycling programmes for solar components and technical training to ensure the sustainability of these systems is highlighted. In conclusion, PV represents a viable solution for rural electrification, but its long-term success will depend on the policy implemented in the countries.*

Keywords- *Sustainable development, rural areas, photovoltaic systems, renewable energy.*

Revisión sistemática sobre la implementación de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales desprovistas de servicios eléctricos de América Latina

Flavio Luis Celinny Carpio-Terrazos¹; Christel Lucero Choque-Yarasca²; Esther Orielle Castillo-Siguas³; Bruno Gimenez-Lopez⁴; Lucy Veronica Godoy-Laurente⁵

^{1,2,3,4,5} Universidad tecnológica del Perú, Perú, U19211024@utp.edu.pe, C20242@utp.edu.pe, C20906@utp.edu.pe, C27313@utp.edu.pe, c20407@utp.edu.pe

Resumen– El estudio busca examinar el impacto de los sistemas fotovoltaicos en zonas rurales sin acceso a electricidad en América Latina. Esto proporcionará una base para decisiones informadas y políticas efectivas que promuevan el desarrollo sostenible en la región. Se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando la estrategia PICOC para formular preguntas sobre calidad de vida, impacto ambiental, beneficios económicos y desarrollo sostenible. Se utilizaron bases de datos como Scopus y se aplicaron criterios rigurosos de inclusión y exclusión. El proceso de selección siguió la metodología PRISMA para garantizar exhaustividad y objetividad. Los resultados mostraron que entre los años 2020 y 2024 se publicaron más estudios sobre sistemas fotovoltaicos. Siendo Brasil el país que lidera en número de investigaciones, seguida de Colombia, Bolivia, Ecuador, Argentina, México y Perú. Los resultados muestran que la energía solar ha permitido ampliar la cobertura energética, reducir las emisiones de carbono y fomentar el desarrollo económico mediante el impulso de actividades agrícolas, comerciales y turísticas. Además, se identificó que, aunque la inversión inicial en paneles solares sigue siendo un obstáculo, los costos operativos y de mantenimiento son significativamente menores a largo plazo. Sin embargo, se destaca la necesidad de estrategias de financiamiento accesibles, programas de reciclaje para los componentes solares y capacitación técnica para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas. En conclusión, la energía fotovoltaica representa una solución viable para la electrificación rural, pero su éxito a largo plazo dependerá de la política que se implemente en los países.

Palabras clave -- Desarrollo sostenible, zonas rurales, sistemas fotovoltaicos, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

El acceso a la electricidad sigue siendo un desafío en muchas zonas rurales de América Latina, donde las comunidades dependen de fuentes de energías ineficientes y costosas. Por tal motivo, a pesar de los avances en electrificación, persisten limitaciones que afectan el desarrollo económico y social de estas regiones [1]. En este contexto, la energía solar fotovoltaica ha surgido como una alternativa viable y sostenible, permitiendo el acceso a electricidad sin la necesidad de infraestructura convencional de distribución [2]. Diversos estudios han demostrado que la implementación de sistemas fotovoltaicos en comunidades aisladas tiene impactos positivos en la calidad de vida, la educación y la productividad local. Ante ello, en Brasil, la electrificación rural ha mejorado la equidad de género y el acceso a oportunidades económicas para las mujeres [3]. Por otro lado, en Ecuador, la

combinación de sistemas fotovoltaicos con estrategias de eficiencia energética ha permitido optimizar el suministro eléctrico en islas y comunidades remotas [4].

Sin embargo, la adopción de esta tecnología enfrenta múltiples barreras. En Colombia, se han identificado problemas relacionados con la sostenibilidad de los sistemas fuera de la red y la falta de políticas públicas que respalden su implementación a largo plazo [5]. De manera similar, en Perú, la regulación de subastas de energías renovables ha facilitado la expansión de proyectos fotovoltaicos, pero aún persisten desafíos en su mantenimiento y financiamiento [6].

Por otro lado, en México, el desarrollo de sistemas de energía descentralizados ha sido clave para la sostenibilidad de comunidades indígenas, promoviendo modelos de autogestión energética [7]. Además, estudios recientes han señalado la importancia de adaptar los sistemas fotovoltaicos a las necesidades locales, considerando variables como la iluminación rural y la demanda energética fluctuante [8].

Este artículo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática sobre la implementación de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales desprovistas de servicios eléctricos en América Latina entre 1994 a 2024. Para, ello, se analizaron estudios de casos en distintos países para evaluar sus beneficios y oportunidades de mejora. Se buscó identificar mejores prácticas, lecciones aprendidas y oportunidades para futuras investigaciones que puedan informar la toma de decisiones y el diseño de políticas efectivas para el desarrollo sostenible en la región.

Además, esta Revisión Sistemática de Literatura (RSL) contribuye al conocimiento existente y ofrece valiosas perspectivas para los diferentes actores involucrados en la promoción y desarrollo de proyectos de energía renovable.

II. METODOLOGÍA

Este estudio utilizó la metodología de revisión sistemática de literatura (RSL), PRISMA. Asimismo, para fortalecer el estudio se empleó la estrategia PICOC (Tabla I), con la finalidad de formular y garantizar preguntas para una investigación adecuada. Iniciando con la siguiente pregunta PICOC general, ¿Cuál es el impacto en la provisión de servicios eléctricos y el desarrollo sostenible, al implementar sistemas fotovoltaicos en zonas rurales desprovistas de energía en América Latina, comparado con los servicios eléctricos

convencionales? Esta pregunta facilita la búsqueda y evaluación de la evidencia científica importante. Por otro lado, esta pregunta consta de subpreguntas, el cual permite enfocar y desglosar la pregunta principal en componentes más específicos, lo que facilita la búsqueda y evaluación de artículos necesarios. De tal modo que, las subpreguntas son las siguientes:

RQ1: ¿Qué impacto se tiene en la calidad de vida de las comunidades rurales, al implementar sistemas fotovoltaicos en comparación con el uso de servicios eléctricos convencionales?

RQ2: ¿Cuáles son las consecuencias de implementar sistemas fotovoltaicos que contribuyen a la conservación medio ambiente en comparación con los servicios eléctricos convencionales?

RQ3: ¿Cuáles son los efectos económicos para las comunidades rurales que implementan sistemas fotovoltaicos con respecto a la alternativa convencional?

RQ4: ¿Cuál es la influencia de la implementación de sistemas fotovoltaicos en el desarrollo sostenible de las comunidades rurales?

Posterior a ello se ha analizado los componentes de la estrategia PICOC, en relación de los sistemas fotovoltaicos, surgiendo la siguiente tabla.

TABLA I DESARROLLO DE CRITERIOS PICOC		
Componentes		Desarrollo
P	Problema /Población	Zonas rurales desprovistas de servicios eléctricos
I	Intervención	Implementación de sistemas fotovoltaicos
C	Comparación	Los efectos de implementar sistemas fotovoltaicos con respecto a los servicios eléctricos convencionales
O	Resultados	Impacto en la provisión de servicios eléctricos
C	Contexto	Desarrollo sostenible

Nota. Elaborado en base al criterio PICOC

Se decidió eliminar el componente "O" (Resultados) de la pregunta PICOC de investigación debido a la naturaleza del tema abordado. Este artículo se enfoca en la implementación de sistemas, y actualmente no se cuenta con resultados concretos en el Perú. Por ello, se optó por realizar una comparación con las experiencias de países vecinos en América Latina, donde estos sistemas ya han sido implementados, mejorando significativamente la calidad de vida en zonas rurales. Además, al incluir el componente "O" en las búsquedas realizadas en Scopus, se reduce significativamente la cantidad de artículos disponibles, lo que dificulta abarcar un mayor número de estudios relevantes para el análisis. Por estas razones, se demostró que es más adecuado eliminar este componente para enriquecer el alcance de la investigación.

A partir de ello, como se muestra en la Tabla II, se utilizó las palabras clave de la estrategia PICC, que se empleó para la búsqueda en la base de datos Scopus.

TABLA II PALABRAS CLAVE POR COMPONENTE		
Componente		Palabras Clave
P	Problema /Población	Rural electrification, Sustainable development, Solar energy, Distributed generation, Wind power, photovoltaic energy, Energy decentralization, Rural development
I	Intervención	Solar panels, Photovoltaic, Facility, Sustainability, Energy efficiency, Emissions reduction, Environmental impact, Self-consumption, Network connection, Energy storage
C	Comparación	Energy autonomy, Decentralization, Costs reduction, Reliability, Sustainability, Reduction of carbon emissions, Access to energy, Technological innovation, Modernization of the electrical grid, Energy efficiency, Climate change mitigation
C	Contexto	Sustainability, Environment, Social equity, Conservation, Renewable energy, Climate change, Responsibility, Responsible consumption, Environmental education, Sustainable resource management, Sustainable innovation

Nota. Elaborado en base al criterio PICOC

Una vez, teniendo las ecuaciones por componentes en base a los criterios PICC, se obtuvo la siguiente ecuación utilizada para la búsqueda en la base de datos Scopus (Tabla III).

TABLA III ECUACIÓN DE BUSQUEDA	
Base De Datos	Ecuación De Busqueda
Scopus	(TITLE-ABS-KEY (rural AND electrification OR "Sustainable development" OR "Solar energy" OR " Distributed generation " OR "Wind power" OR "photovoltaic energy " OR "Energy decentralization" OR " Rural development") AND TITLE-ABS-KEY (solar AND panels OR "Photovoltaic," OR "Facility" OR " Sustainability" OR " Energy efficiency " OR "Emissions reduction" OR " Environmental impact " OR "Self-consumption " OR "Network connection" OR " Energy storage") AND TITLE-ABS-KEY (energy AND autonomy OR "Decentralization " OR "Costs reduction " OR "Reliability, Sustainability " OR "Reduction of carbon emissions " OR "Access to energy" OR " Technological innovation " OR "Modernization of the electrical grid" OR " Energy efficiency" OR " Climate change mitigation") AND TITLE-ABS-KEY (sustainability OR "Environment " OR "Social equity " OR "Conservation " OR "Renewable energy" OR " Climate change" OR " Responsibility" OR " Responsible consumption" OR " Environmental education" OR " Sustainable resource management " OR "Sustainable innovation")) AND PUBYEAR > 1993 AND PUBYEAR < 2025

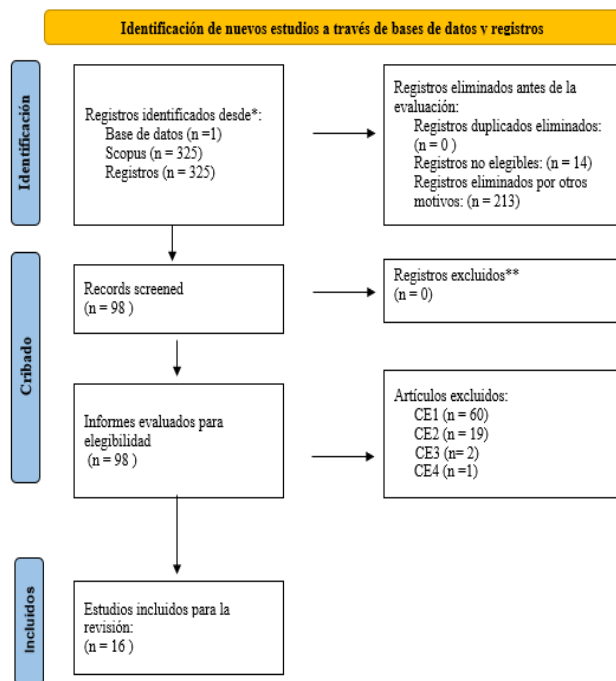
Nota. Elaborado en base al criterio PICOC

Posterior a ello, se utilizó metodología PRISMA, aplicando la ecuación de búsqueda en Scopus. El resultado de fue una lista de estudios académicos que coinciden con los términos de búsqueda especificados. De los cuales se obtuvo 325 resultados obtenidos en la base de datos, luego de verificarlos se encontraron 0 artículos duplicados, se eliminaron 14 documentos que eran ilegibles, 213 documentos que no tiene acceso abierto, que impide visualizar el documento completo. Quedando 98 documentos, se

procedió a una revisión exhaustiva a partir de la revisión del título, el resumen y el documento completo.

Fig. 1 Diagrama de flujo de la revisión metodológica PRISMA.

Para cumplir con el objetivo de este artículo de revisión,



se procedió a delimitar los criterios de inclusión y exclusión.

Los criterios que se han establecido para incluir o excluir los diferentes artículos de estudio son los siguientes:

A. Criterios de inclusión

- CI1: Los estudios incluidos deben abordar la implementación de sistemas fotovoltaicos
- CI2: Los estudios que evalúen la viabilidad de proyectos energéticos en zonas rurales en el contexto del desarrollo sostenible
- CI3: Los estudios incluidos deben abordar el impacto que tiene la provisión de sistemas fotovoltaicos con respecto a los servicios eléctricos convencionales
- CI4: Los estudios se han desarrollado en zonas rurales desprovistas de energía en América Latina.

B. Criterios de exclusión

- CE1: Estudios que se centren en regiones fuera de América Latina
- CE2: Tipo de publicación NO corresponde al artículo original (no se incluyen, tesis, libros de texto universitario, material no indexado).
- CE3: Publicaciones en idiomas diferentes al inglés y español.
- CE4: Estudios publicados hace más de diez años, a menos que sean fundamentales o históricos en la comprensión del desarrollo de la tecnología fotovoltaica en zonas rurales.

Utilizando los criterios de exclusión, se eliminaron las siguientes cantidades de estudios:

CE1 = 60 estudios fuera de América Latina.

CE2 = 19 conferencias y artículos de revisión.

CE3 = 2 estudios de idiomas diferentes al inglés y español.

CE4 = 1 estudio de más de 10 años que no es fundamental.

Al ser revisados los documentos y utilizando los criterios de exclusión, quedaron 16 artículos científico que formaron parte de la RSL, que se pueden visualizar en la figura 1.

III. RESULTADOS

A. Resultados bibliométricos de la revisión sistemática:

A continuación, se presentará el análisis de los resultados bibliométricos obtenidos mediante la recopilación de datos de extracción de información.

A.1. Volumen de publicación anual

La información bibliográfica se organiza según los años de publicación, como se muestra en la Figura 2. Se puede ver que entre los años 2020 y 2023 fueron los años con mayor representación, ya que cada uno está representando con el 19% del total de artículos científicos publicados, lo que equivale a 3 artículos cada año que aportan información relevante para esta revisión sistemática. Además, los años 2019 y 2022 también fueron significativos, con cada uno contribuyendo con el 12% del total de estudios, correspondiente a 2 artículos por año.

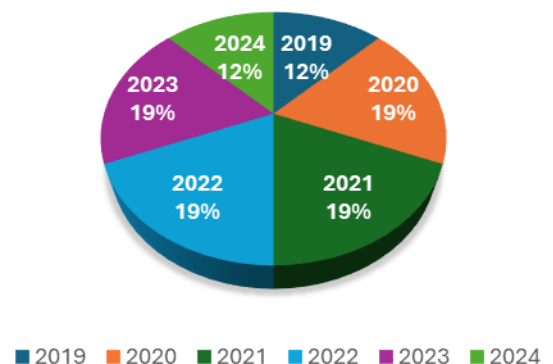


Fig. 2 Volumen de publicación anual.

A.2. Origen de los estudios

En la figura 3, se tiene el porcentaje de origen de los estudios, se aprecia un empate entre los países de México y Perú con un 6.25% cada uno del porcentaje total, numéricamente le corresponde 1 artículo por país. Por otro lado, se puede observar que de intermedio se encuentran los países de Bolivia, Argentina y Ecuador con un 12.50% cada uno, esto significaría que cada país tiene 2 artículos. Asimismo, Colombia con un 18.75% lo que equivale a 3 artículos y finalmente, con un porcentaje del 31,25 % se puede

apreciar que Brasil es el país que más artículos presenta con una cantidad de 5 artículos para la RSL.

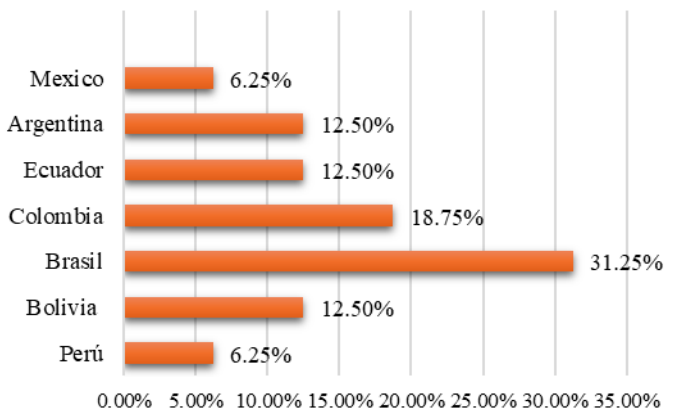


Fig.. 3 Producción científica por países.

B. Resultados de preguntas PICC

B.1. Los efectos de implementar sistemas fotovoltaicos con respecto a los servicios eléctricos convencionales

En la tabla IV, se identifica el efecto de la implementación en la calidad de vida de los individuos de América Latina. Así tenemos, el acceso a la electricidad en comunidades rurales aisladas que ha sido un desafío histórico debido a la dificultad de extender la infraestructura de las redes convencionales. En Argentina, la generación de paneles fotovoltaicos distribuidos ha permitido ampliar la cobertura en zonas donde la conexión a la red es inviable debido a los altos costos de expansión y la dispersión geográfica de la población [1].

Por otra parte, en Ecuador, se destacan que los sistemas fotovoltaicos híbridos han demostrado ser una alternativa eficiente en islas y comunidades remotas, donde la conexión a la red nacional no es factible [4]. En contraste, las redes eléctricas convencionales han mostrado limitaciones para garantizar el acceso equitativo en regiones apartadas debido a la falta de incentivos para la inversión en infraestructuras extensivas. En América Latina, los sistemas electros convencionales dependen en gran medida de hidroeléctricas y termoeléctricas, las cuales pueden generar impactos negativos en los ecosistemas, ya sea por la deforestación asociada a represas o por la emisión de CO₂ en plantas térmicas [9].

Además, los sistemas fotovoltaicos permiten una mayor autonomía energética en comparación con las redes convencionales. En el caso de comunidades indígenas en México, donde la instalación de paneles solares ha permitido la autogestión del suministro eléctrico, reduciendo la dependencia de empresas de distribución y fortaleciendo la resiliencia local [7].

Asimismo, los sistemas convencionales pueden ser vulnerables a interrupciones por fallas en la infraestructura o desastres naturales, como ha ocurrido en regiones amazónicas

de Brasil, donde las líneas eléctricas sufren daños frecuentes por tormentas y deforestación [10].

Sin embargo, la electrificación mediante energía solar ha tenido efectos positivos en la calidad de vida de las comunidades rurales. Se resaltan que la iluminación nocturna y el acceso a electrodomésticos han mejorado la educación, la salud y la productividad de muchas familias en zonas rurales de América Latina [8].

TABLA IV
COMPARACIÓN DE CALIDAD DE VIDA

País /Autor	Salud	Tecnología y comunicación	Educación
Perú [6]	Mejora en atención médica en zonas rurales por iluminación continua.	Incremento en acceso a dispositivos básicos en centros rurales para la comunicación	Facilita el acceso a internet en escuelas rurales con energía confiable.
Brasil [2], [3], [10], [11], [12]	Reducción de enfermedades respiratorias al reemplazar generadores diésel.	Impulso al desarrollo de tecnologías solares locales y expansión de la comunicación.	Expansión de oportunidades educativas con energía estable.
Colombia [9], [13], [14]	Mayor cobertura eléctrica en centros de salud rurales.	Crecimiento de proyectos de Investigación y desarrollo en energías renovables y conectividad.	Mejora del acceso a herramientas tecnológicas en escuelas rurales.
Ecuador [4], [15]	Mejora en la refrigeración de medicamentos esenciales.	Adopción de tecnología solar en pequeñas empresas.	Ampliación de acceso a herramientas digitales para educación.
Argentina [1], [16]	Menor dependencia de combustibles fósiles en hospitales rurales.	Desarrollo de políticas para incentivar la innovación en energía solar y las telecomunicaciones	Mayor acceso a recursos educativos en comunidades rurales.
México [7]	Incremento en calidad de servicios médicos en zonas sin acceso previo.	Crecimiento de startups enfocadas en energía fotovoltaica y ampliación de cobertura de telefonía móvil	Mayor inclusión educativa en comunidades marginadas.
Bolivia [5], [8]	Mejora en la calidad del aire, menos enfermedades respiratorias	Aumento en las horas de estudio, mejor uso de recursos tecnológicos para acceso a información digital	Mayor acceso a computadoras y dispositivos móviles

B.2. Impacto ambiental en la implementación de sistemas fotovoltaicos en zonas rurales

En la Tabla V, se muestra que uno de los principales beneficios ambientales de la energía fotovoltaica es su contribución a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Asimismo, en Argentina, se destacan que la generación distribuida mediante paneles solares que ha permitido disminuir la dependencia de combustibles fósiles, reduciendo así la huella de carbono en las comunidades rurales [1].

Por otro lado, en Ecuador, donde la combinación de energía solar con medidas de eficiencia energética ha optimizado el uso de recursos, disminuyendo la necesidad de generadores diésel y reduciendo la contaminación atmosférica [4]. De manera similar, en Brasil, la electrificación rural con fuentes renovables ha sido clave para disminuir la deforestación relacionada con el uso de biomasa para la generación de energía [12].

Aunque los paneles solares no generan emisiones durante su operación, su fabricación implica el uso de materiales con impacto ambiental. En la producción de módulos fotovoltaicos requiere minerales como silicio, plata y litio, cuya extracción puede generar contaminación y alteraciones ecológicas si no se realiza de manera sostenible [11].

En este sentido, en Perú se han promovido regulaciones para el manejo responsable de desechos electrónicos provenientes de paneles solares al final de su vida útil, con el fin de minimizar su impacto en el entorno [6].

El éxito de los sistemas fotovoltaicos en zonas rurales depende también de la educación y concienciación sobre su impacto ambiental. Del mismo modo en Argentina, los programas de capacitación han sido esenciales para garantizar el uso eficiente de la energía solar y fomentar prácticas sostenibles entre los habitantes de comunidades rurales [16].

TABLA V
COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

País/ Autor	Biodiversidad	Emisiones	Residuos
Perú [6]	Menor impacto en hábitats naturales, reducción de la deforestación	Reducción significativa de CO ₂ y otros gases contaminantes	Generación mínima de residuos durante la operación, larga vida útil de los paneles
Brasil [2], [3], [10], [11], [12]	Conservación de la selva amazónica, menos alteración del ecosistema	Disminución notable de emisiones de gases de efecto invernadero	Menores residuos peligrosos, reciclabilidad de componentes solares
Colombia [9], [13], [14]	Costos iniciales elevados, programas de subsidios disponibles	Menor mantenimiento requerido y mayor durabilidad	Mejora económica a través de ahorro energético y oportunidades laborales en energías renovables

Ecuador [4], [15]	Inversión inicial alta, incentivos fiscales y subsidios	Costos de mantenimiento bajos y menos reemplazo de equipos	Fortalecimiento de la economía rural, reducción de gastos energéticos y empleo en el sector fotovoltaico
Argentina [1], [16]	Reducción de la presión sobre los ecosistemas naturales	Disminución de las emisiones de carbono y otros contaminantes	Menores residuos generados durante la operación, componentes reciclables
México [7]	Menor impacto ambiental en áreas rurales, protección de la fauna local	Disminución considerable de las emisiones contaminantes	Reducción de residuos peligrosos, reciclabilidad de los componentes solares
Bolivia [5], [8]	Menor impacto en áreas protegidas, protección de especies endémicas	Reducción de gases de efecto invernadero y otros contaminantes	Reducción de residuos tóxicos, mayor vida útil de los equipos

B.3. Beneficios económicos se obtienen al implementar sistemas fotovoltaicos en zonas rurales

Aunque la inversión inicial en sistemas fotovoltaicos puede ser más alta, existen los beneficios económicos a largo plazo, incluyendo menores costos de mantenimiento y el estímulo a la economía local, hacen que la energía solar sea una opción ventajosa para las zonas rurales desprovistas de energía en América Latina. "las experiencias con sistemas solares domiciliarios de tercera generación en Latinoamérica han demostrado ser económicamente beneficiosas" [13].

En la Tabla VI, se visualiza que uno de los principales beneficios económicos de los sistemas fotovoltaicos es la reducción de costos asociados al acceso a la energía. Por ejemplo, en Argentina, la generación distribuida con paneles solares ha permitido reducir la dependencia de combustibles fósiles y los costos de operación en comunidades rurales, donde la electricidad convencional es costosa o inexistente [1].

En Ecuador, se analizaron la implementación de sistemas híbridos con energía solar, encontrando que los costos de generación eléctrica se redujeron en un 40% en comparación con el uso de generadores diésel, los cuales requieren un suministro constante de combustible [4].

El acceso a programas de financiamiento y subsidios ha sido clave para la expansión de la energía solar en América Latina. En Perú, las subastas de energías renovables han permitido que las comunidades rurales accedan a soluciones fotovoltaicas con costos reducidos, gracias a incentivos gubernamentales [6].

De manera similar, en Colombia, la implementación de sistemas solares en zonas no interconectadas ha sido posible mediante modelos de financiamiento sostenible, como asociaciones público-privadas y tarifas subsidiadas, lo que garantiza la viabilidad económica a largo plazo [5].

El acceso a electricidad confiable a través de energía solar ha permitido a las comunidades rurales diversificar sus actividades económicas. En Colombia, los sistemas

fotovoltaicos han facilitado la mecanización agrícola y la implementación de sistemas de riego, aumentando la producción y reduciendo la dependencia de ciclos estacionales [8].

En el caso de Ecuador, señalan que la electrificación fotovoltaica ha mejorado las condiciones para el turismo rural, al permitir el funcionamiento de alojamientos sostenibles y la iluminación de espacios recreativos, atrayendo visitantes y generando ingresos adicionales [15].

TABLA VI
BENEFICIOS ECONÓMICOS

País/ Autor	Costos Iniciales	Mantenimiento	Economía Local
Perú [6]	Altos costos iniciales debido a la importación de equipos.	Bajos costos de mantenimiento a largo plazo por la durabilidad de los paneles.	Generación de empleo local en instalación y mantenimiento.
Brasil [2], [3], [10], [11], [12]	Inversión inicial alta, pero con incentivos gubernamentales en algunas regiones.	Mantenimiento accesible por la producción local de componentes solares.	Impulso a pequeñas empresas locales mediante acceso a energía estable.
Colombia [9], [13], [14]	Costos iniciales elevados, aunque se benefician de subsídios estatales.	Mantenimiento sencillo y económico en zonas rurales.	Promoción del desarrollo agrícola y productivo gracias a la energía solar.
Ecuador [4], [15]	Inversión inicial alta, pero amortizable con programas de financiamiento.	Bajos costos de mantenimiento con capacitación técnica local.	Creación de empleo y mejora de actividades agrícolas y comerciales.
Argentina [1], [16]	Costos iniciales altos debido a la dependencia de importaciones.	Mantenimiento económico con soporte técnico nacional en crecimiento.	Reducción de costos energéticos para comunidades rurales.
México [7]	Inversión inicial significativa, pero apoyada por incentivos fiscales.	Mantenimiento accesible con disponibilidad de técnicos capacitados.	Impulso a la economía local mediante acceso a energía para negocios.
Bolivia [5], [8]	Altos costos iniciales, apoyo de organizaciones internacionales	Bajo costo de mantenimiento, vida útil prolongada	Estimulación de la economía local, creación de empleos y reducción de dependencia de combustibles fósiles

B.4 Desarrollo sostenible de las comunidades rurales en América Latina

En la tabla VII, se presenta los hallazgos sobre el desarrollo sostenible en comunidades rurales de América Latina, la cual se ha convertido en un eje central de las políticas energéticas y ambientales de la región. La integración de energías renovables, la promoción de modelos económicos inclusivos y la protección del medio ambiente son pilares fundamentales para garantizar el bienestar de estas comunidades en el largo plazo. A continuación, se analiza cómo diversas estrategias han contribuido a la sostenibilidad en términos de energía, economía, medio ambiente y cohesión social.

El acceso a la electricidad es esencial para el desarrollo de las comunidades rurales. La generación distribuida mediante sistemas fotovoltaicos ha sido una solución efectiva en Argentina para proveer energía limpia y asequible a comunidades aisladas, reduciendo su dependencia de combustibles fósiles [1]. Por ejemplo, en Ecuador, la implementación de sistemas híbridos ha permitido optimizar la generación eléctrica, promoviendo un modelo energético sostenible que combina eficiencia y accesibilidad [4].

El desarrollo sostenible en comunidades rurales depende de la generación de oportunidades económicas. En Perú, las subastas de energías renovables han facilitado el acceso a financiamiento para proyectos solares, impulsando la inversión en infraestructura y generando empleo en el sector energético [6]. Asimismo, en Colombia, los sistemas fotovoltaicos han permitido la electrificación de regiones aisladas, favoreciendo la creación de microempresas y la mejora en la productividad agrícola gracias a la disponibilidad de energía para sistemas de riego y refrigeración [5].

Por otra parte, en Colombia, el acceso a electricidad ha mejorado significativamente las condiciones de salud y educación en comunidades rurales, facilitando el uso de equipos médicos y extendiendo las horas de estudio para niños y jóvenes [8].

TABLA VII
DESARROLLO SOSTENIBLE

País/ Autor	Autonomía	Capacidad de Adaptación	Empleo
Perú [6]	Incremento en la independencia energética con sistemas fotovoltaicos.	Adaptación moderada debido a la falta de experiencia previa en energía solar.	Creación de empleos locales en instalación y mantenimiento de sistemas.
Brasil [2], [3], [10], [11], [12]	Gran potencial para lograr autonomía energética en comunidades rurales.	Alta capacidad de adaptación gracias a políticas públicas de apoyo.	Generación de empleo en la industria de energías renovables.
Colombia [9], [13], [14]	Avance hacia la autosuficiencia energética en zonas remotas.	Adaptación rápida en comunidades con apoyo estatal y capacitación.	Creación de empleos en la producción y distribución de energía solar.

Ecuador [4], [15]	Mejora en la autonomía energética de comunidades aisladas.	Adaptación progresiva con programas de capacitación técnica.	Nuevas oportunidades laborales en instalación y gestión de energía solar.
Argentina [1], [16]	Incremento en la autosuficiencia energética en regiones rurales.	Adaptación moderada debido a desafíos económicos y logísticos.	Generación de empleo en proyectos de energía renovable.
México [7]	Mayor autonomía energética con incentivos para energía solar.	Alta capacidad de adaptación con programas de financiamiento y formación.	Incremento en empleos relacionados con energías limpias.
Bolivia [5], [8]	Reducción de la dependencia energética externa	Flexibilidad para operar en diferentes áreas rurales	Incremento en empleos locales, formación en energías renovables

IV. DISCUSIÓN

La presente revisión sistemática resalta que los sistemas fotovoltaicos han mejorado significativamente el acceso a la electricidad en zonas rurales, proporcionando autonomía energética y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de quienes demostraron que el uso de microrredes híbridos (paneles solares, generadores y almacenamiento en baterías) en comunidades rurales de Togo permitió mejorar la cobertura eléctrica y la calidad del servicio para telecomunicaciones [17].

Sin embargo, mientras que el estudio de Dadjiogou enfatiza el uso de microrredes para la optimización energética y la reducción de costos en telecomunicaciones, nuestros hallazgos se centran en la electrificación residencial y productiva de comunidades rurales [17]. Aun así, ambos estudios concuerdan en que los sistemas fotovoltaicos ofrecen una solución más eficiente y accesible en comparación con las redes convencionales, que a menudo no logran expandirse debido a los altos costos de infraestructura y mantenimiento.

Los resultados del estudio señalan que la implementación de energía fotovoltaica reduce las emisiones de CO₂ y mitiga la deforestación derivada del uso de biomasa, coincide con estos resultados al afirmar que los sistemas fotovoltaicos en regiones rurales de países en desarrollo han contribuido a la reducción de la dependencia de generadores diésel y otras fuentes de energía contaminantes [18].

No obstante, Feron también destaca desafíos ambientales relacionados con la producción y el diseño de paneles solares, algo que no se enfatizó en nuestro estudio. Indica que la fabricación de módulos fotovoltaicos requiere el uso de materiales críticos como silicio, plata y litio, cuya extracción puede generar contaminación ambiental si no se gestiona de manera sostenible [18]. Esta diferencia en el enfoque sugiere la necesidad de futuras investigaciones que integren el ciclo de vida completo de los sistemas fotovoltaicos en su impacto ambiental.

Los resultados de esta revisión sugieren que los sistemas fotovoltaicos contribuyen significativamente a la reducción de costos energéticos en comunidades rurales, lo que favorece el desarrollo de actividades económicas como la mecanización agrícola, el turismo rural y el comercio. En línea con esto, presentan un análisis sobre la viabilidad económica de la energía solar, enfatizando que su integración con almacenamiento y otras fuentes renovables permite optimizar costos y mejorar la sostenibilidad financiera de los proyectos [19].

Sin embargo, Motamedisedeh et al. se centran en la optimización de la capacidad instalada mediante modelos matemáticos, mientras que nuestro estudio analiza el impacto directo en la economía local. A pesar de estas diferencias metodológicas, ambos estudios coinciden en que la energía solar representa una alternativa rentable frente a las fuentes convencionales, especialmente en zonas aisladas donde el costo de expansión de la red es prohibitivo [19].

La presente investigación resalta el papel de la energía fotovoltaica en la promoción de la autonomía energética, la mejora de la educación y la reducción de brechas socioeconómicas en comunidades rurales. Estos hallazgos se alinean con los resultados de Feron, quien en su estudio de revisión sistemática argumenta que la electrificación sostenible en regiones rurales debe ir acompañada de programas de capacitación y políticas de apoyo para garantizar su éxito a largo plazo [18].

Además, la importancia de las microrredes inteligentes como estrategia para maximizar el aprovechamiento de la energía solar y garantizar un suministro estable en comunidades remotas [17]. En este sentido, si bien la revisión no aborda específicamente la gestión avanzada de redes inteligentes, los resultados sugieren que la integración de estas tecnologías podría mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en América Latina.

V. CONCLUSIÓN

Finalmente, la investigación resalta el notable impacto de la implementación de sistemas fotovoltaicos en las comunidades rurales de América Latina. A lo largo de los años 2021 y 2023, se registró el mayor número de publicaciones científicas, reflejando un creciente interés en esta tecnología, se destacó a Brasil como el país con más investigaciones

publicadas, lo que subraya la influencia positiva de las políticas gubernamentales en la promoción de la energía solar.

La adopción de sistemas fotovoltaicos ha mejorado significativamente la calidad de vida de las comunidades rurales, ofreciendo una alternativa más limpia y sostenible en comparación con los servicios eléctricos convencionales. Desde una perspectiva de salud, se observó una reducción en la exposición a contaminantes y una mejora en la salud pública debido a la menor dependencia de combustibles fósiles.

En el ámbito educativo, las escuelas rurales experimentaron un acceso mejorado a la energía, lo que aumentó la asistencia y el rendimiento escolar. Además, el acceso a dispositivos electrónicos y servicios tecnológicos ha facilitado tanto la educación como las actividades cotidianas, mejorando la conectividad y el acceso a la información.

Se recomienda fortalecer los incentivos gubernamentales para la financiación de proyectos solares, fomentar la integración de microrredes inteligentes para mejorar la estabilidad del suministro y desarrollar normativas para el reciclaje de paneles solares y baterías. Además, es esencial impulsar programas de formación técnica en comunidades rurales para garantizar la sostenibilidad de los sistemas implementados.

En conclusión, la energía fotovoltaica representa una alternativa sostenible y eficiente para la electrificación rural en América Latina. Sin embargo, su éxito a largo plazo dependerá de la implementación de estrategias integrales que combinen innovación tecnológica, políticas de financiamiento accesibles y un enfoque participativo en las comunidades beneficiadas.

REFERENCIAS

- [1] P. Schaubé, A. Ise, y L. Clementi, «Distributed photovoltaic generation in Argentina: An analysis based on the technical innovation system framework», *Technol. Soc.*, vol. 68, p. 101839, feb. 2022, doi: 10.1016/j.techsoc.2021.101839.
- [2] V. D. F. Grah, I. De Matos, D. G. Alves, E. Saretta, y R. Duarte Coelho, «Conversion of Solar Photovoltaic Energy into Hydraulic Energy Applied to Irrigation System Using a Manual Sun Tracking», *IRRIGA*, vol. 25, n.º 3, pp. 508-520, sep. 2020, doi: 10.15809/irriga.2020v25n3p508-520.
- [3] A. Leduchowicz-Municio, M. Juanpera, B. Domenech, L. Ferrer-Martí, M. E. M. Udaeta, y A. L. V. Gimenes, «Field-driven multi-criteria sustainability assessment of last-mile rural electrification in Brazil», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 192, p. 114211, mar. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114211.
- [4] R. Hidalgo-Leon *et al.*, «Feasibility Study for Off-Grid Hybrid Power Systems Considering an Energy Efficiency Initiative for an Island in Ecuador», *Energies*, vol. 15, n.º 5, p. 1776, feb. 2022, doi: 10.3390/en15051776.
- [5] A. A. Eras-Almeida, M. Fernández, J. Eisman, J. G. Martín, E. Caamaño, y M. A. Egido-Aguilera, «Lessons Learned from Rural Electrification Experiences with Third Generation Solar Home Systems in Latin America: Case Studies in Peru, Mexico, and Bolivia», *Sustainability*, vol. 11, n.º 24, p. 7139, dic. 2019, doi: 10.3390/su11247139.
- [6] H. Lucas, P. Del Río, y L. F. Cabeza, «Stand-alone renewable energy auctions: The case of Peru», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 55, pp. 151-160, abr. 2020, doi: 10.1016/j.esd.2020.01.009.
- [7] L. B. López-Sosa y C. A. García, «Towards the construction of a sustainable rural energy system: Case study of an indigenous community in Mexico», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 70, pp. 524-536, oct. 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.08.022.
- [8] M. Fernandez, J. Morales, C. Román, E. Quinchimba, D. Sánchez, y Á. Carrera, «Sistema Fotovoltaico: Alternativa de Energía Renovable para la Iluminación en la Ruralidad», *RISTI - Rev. Ibérica Sist. E Tecnol. Informação*, pp. 78-92, dic. 2023.
- [9] D. L. Cadavid, K. G. Salazar Serna, A. Valencia Arias, y C. J. Franco, «Las ciudades y el sol: paridad de red de la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos en los hogares en Colombia», *ACE Archit. City Environ.*, vol. 15, n.º 43, p. 8772, jun. 2020, doi: 10.5821/ace.15.43.8772.
- [10] G. S. Figueirêdo y L. A. Rossi, «Photovoltaic energy in the enhancement of indigenous education in the Brazilian Amazon», *Energy Policy*, vol. 132, pp. 216-222, sep. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.05.037.
- [11] B. M. De Jesus *et al.*, «Proposed New Construction in Solar Energy Collection with Higher Efficiency and Quality», *Int. J. Qual. Res.*, vol. 18, n.º 4, pp. 1093-1106, nov. 2024, doi: 10.24874/IJQR18.04-11.
- [12] A. Leduchowicz-Municio, B. Domenech, L. Ferrer-Martí, M. E. M. Udaeta, y A. L. V. Gimenes, «Women, equality, and energy access: Emerging lessons for last-mile rural electrification in Brazil», *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 102, p. 103181, ago. 2023, doi: 10.1016/j.erss.2023.103181.
- [13] A. A. Eras-Almeida, T. Vázquez-Hernández, M. J. Hurtado-Moncada, y M. A. Egido-Aguilera, «A Comprehensive Evaluation of Off-Grid Photovoltaic Experiences in Non-Interconnected Zones of Colombia: Integrating a Sustainable Perspective», *Energies*, vol. 16, n.º 5, p. 2292, feb. 2023, doi: 10.3390/en16052292.
- [14] J. P. Viteri, F. Henao, J. Cherni, y I. Dynner, «Optimizing the insertion of renewable energy in the off-grid regions of Colombia», *J. Clean. Prod.*, vol. 235, pp. 535-548, oct. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.327.
- [15] M. V. Ávila-Paredes, E. T. Flores-Lazo, J. C. Cobos-Torres, y M. S. Alvarez-Vera, «Sistemas fotovoltaicos en sectores del Ecuador con difícil acceso y/o desprovistos de servicio eléctrico: Un estudio desde las experiencias latinoamericanas», *Rev. Fuentes El Reventón Energético*, vol. 21, n.º 2, sep. 2023, doi: 10.18273/revfue.v21n2-2023003.
- [16] S. C. Carrizo y G. Jacinto, «Andes septentrionales argentinos: una fábrica de territorios energéticos», *Rev. Géographie Alp.*, n.º 109-3, dic. 2021, doi: 10.4000/rga.9705.
- [17] K. Z. Dadjiogou, A. S. A. Ajavon, y Y. Bokovi, «Enhancing energy access in rural areas: Intelligent microgrid management for universal telecommunications and electricity», *Clean. Energy Syst.*, vol. 9, p. 100136, dic. 2024, doi: 10.1016/j.cles.2024.100136.
- [18] S. Feron, «Sustainability of Off-Grid Photovoltaic Systems for Rural Electrification in Developing Countries: A Review», *Sustainability*, vol. 8, n.º 12, p. 1326, dic. 2016, doi: 10.3390/su8121326.
- [19] O. Motamedisadeh, S. Omrani, A. Karim, R. Drogemuller, y G. Walker, «A comprehensive review of optimum integration of photovoltaic-based energy systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 207, p. 114935, ene. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.114935.