Revista Multidisciplinaria Perspectiva Científica

Vol. 3 Núm. 2 (2026)

ISSN: 3136-277X

EDITORIAL MULTIDISCIPLINARIA INTEGRACIÓN SRL.

RMPC-Vol.3. N2. 006

Producción de hidrógeno verde mediante energía solar fotovoltaica en Bolivia: potencial, tecnologías y desafíos para su implementación

Green hydrogen production through solar photovoltaic energy in Bolivia: potential, technologies, and implementation challenges

Autores:

Ariel Rey Villca Pozo
Universidad Técnica de Oruro
Oruro - Bolivia
avillcap@professional.universidadviu.es
https://orcid.org/0000-0002-0972-6946

Wilson Ángel Gutiérrez Rodríguez
Universidad Técnica de Oruro
Oruro - Bolivia
dicytfactec@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8188-1441

Zulema Conto Quispe
Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Cusco - Perú
zulema.conto@unsaac.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-1971-7648

Wilson Iván Gutiérrez Peña
Universidad Católica San Pablo
La Paz - Bolivia
wilsonwigp@gmail.com
https://orcid.org/0009-0009-3402-0134

Autor de correspondencia: *Ariel Rey Villca Pozo*, avillcap@professional.universidadviu.es

Recepción: 20-octubre-2026 **Aceptación:** 03-noviembre-2026 **Publicación:** 22-noviembre-2026

Cómo citar este artículo:

Villca Pozo, A. R., Gutiérrez Rodríguez, W. Ángel, Conto Quispe, Z., & Gutiérrez Peña, W. I. (2026). Producción de hidrógeno verde mediante energía solar fotovoltaica en Bolivia: potencial, tecnologías y desafíos para su implementación. *Revista Multidisciplinaria Perspectiva Científica*, 1-20. https://doi.org/10.68503/n4ex6a66

RESUMEN

El presente artículo examina el potencial de la producción del hidrógeno verde a partir de la energía solar fotovoltaica en Bolivia, en este contexto donde la transición energética y la descarbonización del sector eléctrico juega un papel importante a nivel mundial. Se realiza una revisión documental de literatura científica y se organizan los hallazgos a partir de tres dimensiones: a) contexto energético, b) tecnologías de electrólisis y c) barreras económicas y regulatorias. Entre los principales resultados destacan que, si bien el Altiplano boliviano presenta una de las mejores condiciones de irradiación solar que tranquilamente podrían sustentar una producción competitiva del hidrógeno verde a nivel regional, existen limitaciones técnicas como las eficiencias de la electrólisis que rara vez superan el 20 % a nivel del sistema integrado y además de los costos económicos de producción que se sitúan entre 2,28 y 7,39 USD por kilogramo. Otro factor a considerar son los vacíos técnicos, normativos regulatorios que retrasan la inversión en este tipo de proyectos. Se concluye que el aprovechamiento de este recurso solar para producir hidrogeno verde requiere estudios técnicos y económicos específicos para determinar sus posibles emplazamientos dentro el territorio boliviano, además de un marco institucional solido que facilite la implementación de proyectos piloto. Por lo que el aprovechamiento solar del potencial boliviano requiere de una articulación entre innovación tecnológica, política energética y cooperación internacional.

Palabras clave: hidrógeno verde, energía solar fotovoltaica, electrólisis, transición energética en Bolivia.

ABSTRACT

This article examines the potential for green hydrogen production using solar photovoltaic energy in Bolivia, within a global context in which the energy transition and the decarbonization of the electricity sector play an increasingly important role. A documentary review of the scientific literature is conducted, and the findings are organized into three main dimensions: (a) the energy context, (b) electrolysis technologies, and (c) economic and regulatory barriers. The main findings indicate that, although the Bolivian Altiplano offers some of the most favorable solar irradiation conditions, which could potentially support regionally competitive green hydrogen production, significant technical limitations remain. These include electrolysis efficiencies that rarely exceed 20% at the integrated system level, as well as production costs ranging from USD 2.28 to USD 7.39 per kilogram. Another relevant factor is the existence of technical and regulatory gaps that hinder investment in this type of project. It is concluded that harnessing this solar resource for green hydrogen production requires specific technical and economic studies to identify suitable potential locations throughout Bolivian territory, together with a robust institutional framework that facilitates the implementation of pilot projects. Therefore, exploiting Bolivia's solar potential requires coordinated efforts involving technological innovation, energy policy, and international cooperation.

Keywords: green hydrogen, solar photovoltaic energy, electrolysis, energy transition in Bolivia.

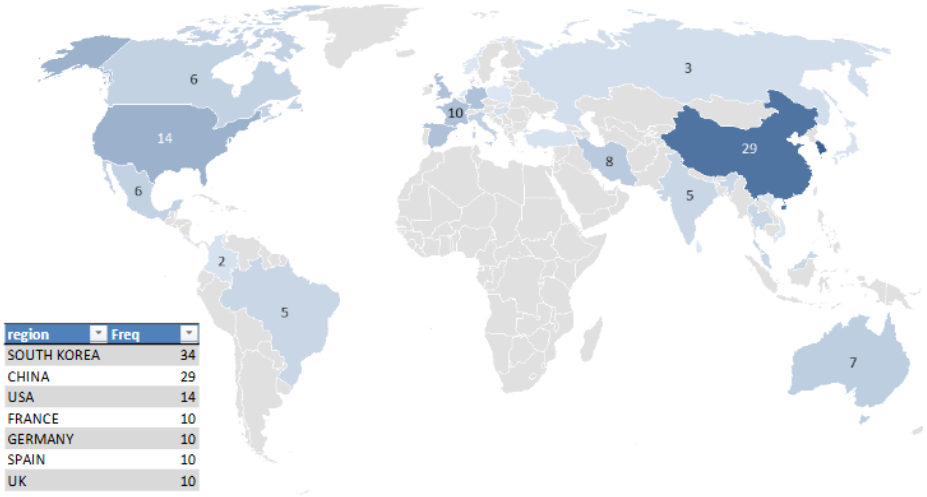
Vol. 3 Núm. 2 (2026)
ISSN: 3136-277X

1. INTRODUCCIÓN

La actual crisis energética mundial se debe a una dependencia excesiva de los combustibles fósiles, es por ello que existe una necesidad urgente de descarbonización, además la transición energética de los países nos exige a reducir esta dependencia y ampliar la participación de fuentes de baja emisión. Las últimas investigaciones han posicionado al hidrógeno verde como un nuevo vector energético estratégico para la sostenibilidad a largo plazo (Padrón-Andrade et al., 2026). La transición hacia sistemas energéticos con menor dependencia del carbono se ve impulsada por la creciente escasez de los recursos fósiles y los severos impactos medio ambientales derivados de su combustión y al actual conflicto del medio oriente. En este contexto, el hidrógeno verde obtenido mediante la electrólisis del agua utilizando fuentes renovables, se sitúa como una alternativa capaz de proporcionar la flexibilidad necesaria para amortiguar la generación eléctrica no utilizada (Vargas Yumayuza et al., 2025), al permitir que el almacenamiento de energía a gran escala y la sustitución de insumos convencionales en sectores de difícil electrificación (Nasser et al., 2022). En la Figura 1 podemos observar la producción científica por países sobre la producción del hidrogeno verde.

Figura 1.

Producción científica sobre el hidrogeno verde por país



region	Freq
SOUTH KOREA	34
CHINA	29
USA	14
FRANCE	10
GERMANY	10
SPAIN	10
UK	10

Nota. Elaborado a partir de Vargas Yumayuza et al., 2025

Dentro de las fuentes de energías renovables, la energía solar fotovoltaica se posiciona como el recurso más atractivo debido a su madurez tecnológica, los costos decrecientes y a su amplia aplicabilidad geográfica (Mir, I.A., Rana, S., Miao, B. et al., 2026). La integración de la electrólisis del agua con generación fotovoltaica permite transformar electricidad renovable en hidrógeno, además ofrece una vía para gestionar parte de la variabilidad intermitente que presenta la generación solar.

En el caso específico de Bolivia el territorio nacional presenta condiciones de irradiación solar excepcionales principalmente en las regiones del Altiplano boliviano, las cuales podrían ser aprovechadas para escalar la producción de este vector energético (Hosseini & Wahid, 2020). Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de este potencial requiere de un análisis crítico que considere la variabilidad climática del país y la optimización de los sistemas de electrólisis a escala industrial, similares a los marcos normativos, técnicos, económicos, evaluados en otros contextos regionales donde se ha demostrado la viabilidad de desplazar los combustibles fósiles mediante los modelos de gestión de los recursos integrados (Quishpi et al., 2022). También, esta implementación de las tecnologías de hidrógeno verde permite descarbonizar los procesos industriales, en los sectores como la siderurgia y el transporte pesado, donde la electrificación directa resulta inviable desde una perspectiva técnica y económica (Raab et al., 2022).

Esta transición energética se ve reforzada por la capacidad que tiene el hidrógeno para actuar como una fuente de almacenamiento a largo plazo, mitigando así las limitaciones de autodescarga que son inherentes a este tipo de sistemas de almacenamiento electroquímico convencional (Chatenet et al., 2022; Ma et al., 2023). El incremento anual de aproximadamente 2,3 % en el consumo energético mundial intensifica la urgencia de adoptar estas tecnologías para mitigar las emisiones de dióxido de carbono debido a este consumo, para así alcanzar los objetivos de neutralidad climática esperados para el año 2050 según el pacto verde europeo (Abdin et al., 2020).

Actualmente, Bolivia enfrenta este gran desafío porque debe alinear sus políticas energéticas con este nuevo paradigma mundial, aprovechando su situación geográfica

estratégica donde la irradiación solar es elevada, para poder diversificar su matriz energética que históricamente ha priorizado el gas natural y la hidroeléctrica. Además, con la nueva eliminación de los subsidios a los combustibles por parde del gobierno central se presenta esta urgente necesidad de diversificar la estructura actual energética. A pesar de este potencial que tiene Bolivia, el despliegue a gran escala de infraestructuras para la generación y el almacenamiento de hidrógeno verde aún enfrenta barreras regulatorias y técnicas significativas que requieren una reestructuración en la planificación energética nacional para fomentar la inversión en tecnologías de electrólisis (Caldeira & Moro, 2025; Evans et al., 2012). Ante este escenario, la nueva creación de cadenas de suministro resilientes y una cooperación internacional estratégica resultan indispensables para superar los elevados costes operativos y las brechas de infraestructura que todavía obstaculizan su escalabilidad a nivel global (Algburi et al., 2025).

Pese a la relevancia del tema, la literatura científica sobre la interacción entre el recurso solar, la madurez de las tecnologías de electrólisis y el entorno regulatorio boliviano resulta todavía escasa, dispersa y fragmentaria. Este vacío de conocimiento justifica la necesidad de sistematizar la evidencia disponible para orientar tanto a la formulación de políticas públicas como a una agenda de investigación aplicada en el país. Por lo mencionado anteriormente, el presente artículo tiene como objetivo analizar mediante una revisión de la literatura científica indexada, el potencial de la producción de hidrógeno verde mediante la producción de energía solar fotovoltaica en Bolivia, identificando los principales debates, consensos y vacíos en torno a los fundamentos conceptuales, las tecnologías de electrólisis asociadas y a las barreras económicas y regulatorias que condicionan su implementación a corto, mediano y largo plazo.

2. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque metodológico cualitativo de carácter documental, mediante una revisión sistematizada de la literatura científica indexada en la base de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, para mapear el estado del arte, identificar los debates, consensos y vacíos conceptuales en torno a la producción del hidrógeno verde de

origen fotovoltaico, más que a generar datos primarios. No obstante, este análisis incorpora una dimensión cuantitativa complementaria que consiste en la forma de cómo se extraen y sistematizan indicadores técnico-económicos reportados por los propios estudios primarios (rangos de eficiencia de electrólisis, costos nivelados de producción en $/kg, niveles de irradiación solar), lo que configura un diseño cuali-cuantitativa de tipo convergente: los datos cualitativos y los indicadores cuantitativos secundarios se analizan de forma paralela y se triangulan en la fase de discusión.

La búsqueda fue mediante combinaciones de descriptores en español e inglés, entre ellos: “hidrógeno verde”, “electrólisis PEM” “energía solar fotovoltaica”, “Hidrógeno Bolivia”, “green hydrogen”, “alkaline electrolysis”, “solar photovoltaic electrolysis” y “green hydrogen policy”. Se priorizaron artículos publicados en revistas indexadas en cuartiles Q1 y Q2, correspondientes aproximadamente al período 2010 - 2026, dando preferencia a la producción más reciente sin excluir las referencias fundamentales sobre electrólisis solar. Los criterios de inclusión se consideraron mediante: a) la producción de hidrógeno mediante electrólisis acoplada a fuentes solares, b) indicadores técnicos, económicos o de política energética verificables.

Se excluyeron notas de prensa, informes sin revisión por pares y estudios centrados exclusivamente en otras formas de producción de hidrógeno que no guardaran relación con la electrólisis solar.

La documentación se organizó y analizó mediante codificación temática, agrupando los hallazgos en tres ejes principales que estructuran el desarrollo de la revisión: 1) fundamentos conceptuales y contexto energético global y nacional, 2) tecnologías de electrólisis acopladas a energía fotovoltaica y 3) barreras económicas, regulatorias y de cadena de suministro para el despliegue en Bolivia. Para cada eje se identificaron los principales consensos, las controversias técnicas y la evolución temporal de los hallazgos reportados.

La metodología presenta una limitación por ser una revisión analítica y no una revisión sistemática conforme al protocolo PRISMA, no se incluye un diagrama de flujo de selección

ni una cuantificación exhaustiva de los estudios identificados. Estas limitaciones no afectan la validez del análisis temático realizado, pero sí delimitan el alcance de las generalizaciones que pueden extraerse para el contexto boliviano.

3. RESULTADOS

A continuación, se presenta el desarrollo de la revisión científica, organizado en tres ejes analíticos.

EJE 1: Fundamentos conceptuales y contexto energético global y nacional del hidrógeno verde

Un primer consenso identificado en la revisión, es que el hidrógeno verde constituye un vector energético y no solamente se considera como una fuente primaria cuya sostenibilidad depende enteramente del origen renovable de la electricidad empleada en su producción (Bedoya et al., 2024; Urrego & Romay, 2020). Diversos autores coinciden que su principal virtud reside en la capacidad de acoplar la generación electica renovable intermitente con las demandas energéticas constantes, funcionando así mismo como mecanismo de almacenamiento estacional que las baterías electroquímicas convencionales no logran igualar debido a sus limitaciones en los ciclos de carga, autodescarga y a los ciclos de vida (Chatenet et al., 2022; Montenegro et al., 2019). Esta función de almacenamiento resulta especialmente relevante en los sistemas eléctricos con alta penetración de fuentes intermitentes como la energía solar fotovoltaica, eólica, marina, donde el hidrógeno permite valorizar excedentes energéticos que de otro modo se perderían al no utilizarse en el sistema eléctrico (Aravindan & Kumar, 2023; Franco & Giovannini, 2023).

En segundo lugar, la literatura documenta una evolución temporal con el argumento que sostiene la urgencia y la necesidad de esta transición energética, las investigaciones enfatizan sobre todo a la eliminación gradual de los combustibles fósiles y a sus impactos ambientales de su combustión. Las ultimas publicaciones se refieren principalmente hacia la competitividad económica decreciente de la energía fotovoltaica como condición habilitante para escalar la electrólisis verde. (Padrón-Andrade et al., 2026). Esta transición sobre la urgencia ambiental y la viabilidad económica es consistente con la caída sostenida

de los costos en la fabricación de los módulos fotovoltaicos y sugiere que el debate se ha desplazado del “por qué” hacia el “cómo” de la producción de hidrógeno verde a gran escala.

Un tercer punto de convergencia se refiere a la utilidad del hidrógeno para descarbonizar sectores de difícil electrificación directa, como la siderurgia, la industria química y el transporte pesado (Raab et al., 2022; Nasser et al., 2022). En estos sectores, la electrificación mediante baterías enfrenta límites técnicos como el peso, autonomía, tiempos de recarga, mientras que el hidrógeno en su forma gaseosa o convertido en combustibles sintéticos pueden superar esta limitante. Abdin et al. (2020), sitúan esta necesidad en el marco del incremento sostenido de la demanda energética global mundial, estimado en alrededor de 2,3 % anual, que intensifica la presión por soluciones de descarbonización escalables.

En lo que respecta específicamente al contexto boliviano, la producción científica sobre el hidrogeno verde está en sus inicios, es escasa frente a la producida por otros continentes como: Europa, el norte de África o Medio Oriente, sin embargo, las mismas coincide en señalar que las condiciones de irradiación solar en zanas altiplánicas presentan una ventaja comparativa relevante para este tipo de regiones (Hosseini & Wahid, 2019; Martens, 2024). Estudios sobre contextos regionales con perfiles de irradiación y altitud comparables muestran la viabilidad técnica de desplazar combustibles fósiles mediante esquemas de gestión integrada de recursos solares (Dominguez et al., 2026; Quishpi et al., 2022), lo que constituye un referente analógico útil ante la ausencia de estudios de casos de estudios consolidados en Bolivia. Por lo tanto, existe un vacío del conocimiento referente a la caracterización específica del recurso solar altiplánico bajo condiciones reales de operación de electrolizadores, lo que limita la capacidad de las estimaciones actuales para orientar decisiones de inversiones que mejore la calidad de vida de la población.

Eje 2: Tecnologías de electrólisis acopladas a energía solar fotovoltaica: eficiencia, costos y madurez tecnológica

Se ha identificado tres familias principales de electrolizadores susceptibles de acoplarse a generación fotovoltaica: la electrólisis alcalina, la electrólisis de membrana de intercambio protónico (PEM) y la electrólisis de óxido sólido (SOEC) (Taoufik & Abdelmajid, 2026). Existe consenso en que la electrólisis alcalina constituye la tecnología más madura y de menor costo de inversión, con eficiencias reportadas entre el 60 % y el 75 % (Nnabuife et al., 2024), lo que la posiciona como alternativa idónea para operación en carga base (Efenwengbe et al., 2025; Parolin et al., 2022). En contraste, la tecnología PEM, pese a exigir mayores costos de capital debido al uso de materiales catalíticos escasos (Terlouw et al., 2022), destaca por su capacidad de respuesta dinámica y su flexibilidad operativa frente a la intermitencia inherente de la irradiación solar (Parkinson et al., 2018; Martínez López et al., 2023), lo que la convierte en la alternativa técnicamente más prometedora para el aprovechamiento de recursos renovables variables.

La electrólisis de óxido sólido por su parte, se encuentra en una etapa de desarrollo comercial menos avanzada, pero ofrece una ventaja competitiva potencial mediante un consumo eléctrico específico significativamente menor que las tecnologías alcalina y PEM (Detz et al., 2018). Este hallazgo introduce una tensión no resuelta en la literatura sobre la madurez tecnológica actual y la eficiencia teórica futura, que va a condicionar las decisiones para la selección tecnológica según el horizonte temporal de la inversión considerando la vida útil del proyecto energético.

En cuanto al desempeño de los sistemas integrados de energía fotovoltaica y electrólisis, existe un consenso relativamente sólido en que la mayoría de las configuraciones actuales presentan dificultades para superar el 20 % de eficiencia a nivel del sistema completo, esto es atribuible principalmente a las metodologías de acoplamiento subóptimas y a las pérdidas energéticas en las etapas de conversión (Zhang et al., 2025; Algburi et al., 2025; Younus et al., 2025). A nivel del electrolizador en forma aislada las pérdidas de acoplamiento, la tasa de conversión energética se sitúa generalmente entre el 60 % y el 80 % (Sadeq et al., 2024). Esta brecha entre la eficiencia del componente y la eficiencia del sistema integrado constituye uno de los principales focos de investigación técnica

identificados en la literatura reciente, y sugiere que buena parte del margen de mejora no reside en el electrolizador en sí mismo, sino en el diseño del acoplamiento eléctrico y en los algoritmos de gestión de la producción variable (Grube et al., 2020; Yates et al., 2020).

Desde la perspectiva económica, los costos de producción de hidrógeno verde oscilan, según la literatura revisada, entre 2,28 y 7,39 USD por kilogramo, lo que impone una barrera de entrada sustancial frente al hidrógeno gris obtenido por reformado de metano, cuyo costo de producción resulta significativamente menor (Bhuiyan & Siddique, 2025). Según distintos autores la viabilidad comercial a largo plazo depende de la transición hacia nuevos diseños del sistema y materiales de menor costo que permitan reducir esta brecha de rentabilidad frente a los combustibles fósiles (Ardo et al., 2018; Shaner et al., 2016). Finalmente, un debate técnico adicional se debe a la durabilidad de los electrodos y los catalizadores frente a los ciclos de encendido y apagado propios de la operación acoplada a un recurso intermitente como la irradiación solar, identificado de forma recurrente como un desafío crítico para la sostenibilidad de estos sistemas a largo plazo.

EJE 3: Barreras económicas, marco regulatorio y cadenas de suministro para el despliegue en Bolivia

Más allá de las limitaciones estrictamente técnicas, la literatura identifica un conjunto de barreras estructurales que condicionan el despliegue del hidrógeno verde en economías emergentes con matrices energéticas históricamente centradas en hidrocarburos, como la boliviana. En primer lugar, se señala la existencia de políticas energéticas fragmentadas y marcos normativos todavía incipientes para regular la generación, el almacenamiento y la comercialización de hidrógeno, lo que introduce incertidumbre regulatoria y desincentiva la inversión de largo plazo (Caldeira & Moro, 2025; Evans et al., 2012).

En segundo lugar, la literatura subraya el déficit de las infraestructuras existentes tanto de transmisión eléctrica como de logística para el transporte y almacenamiento de hidrógeno como un factor que limita la competitividad del sector y que exige inversiones complementarias sustanciales antes de que la producción a escala resulte rentable (Atencio et al., 2026). A ello se suma la fragilidad de las cadenas de suministro de componentes

críticos del sistema particularmente los catalizadores y las membranas empleados en electrolizadores PEM, cuya disponibilidad depende de mercados internacionales concentrados y expuestos a tensiones geopolíticas (Algburi et al., 2025; Terlouw et al., 2022).

Frente a esta situación, un tercer eje de discusión en la literatura se plantea que la superación de estas barreras requiere de estrategias combinadas: por un lado, la construcción de cadenas de suministro resilientes mediante la diversificación de los proveedores y el desarrollo de las capacidades locales, por otro lado, debe existir una cooperación internacional estratégica que permita acceder a financiamiento concesional, transferencia tecnológica y mercados de exportación para el hidrógeno verde producido con los recursos solares altiplánicos (Algburi et al., 2025; Chasiluisa et al., 2022). Estudios de casos regionales con perfiles de recursos e infraestructura comparables a los de Bolivia muestran que la combinación de incentivos fiscales, marcos regulatorios estables y alianzas público-privadas ha resultado determinante para atraer inversión en proyectos piloto de electrólisis solar en otros contextos (Dominguez et al., 2026).

En síntesis, mientras el eje técnico de la literatura se muestra relativamente optimista respecto al potencial físico del recurso solar en zonas del altiplano, el eje regulatorio y económico introduce un factor de prudencia en el análisis, sin una reestructuración de la planificación energética nacional que brinde seguridad jurídica y consolide la infraestructura habilitante, el desarrollo de este potencial permanecerá limitado a iniciativas piloto de baja escala.

4. DISCUSIÓN

La lectura conjunta de los tres ejes revisados permite sostener que el hidrógeno verde de origen fotovoltaico constituye un vector energético con capacidad real de transformar la matriz energética boliviana, en la medida en que articula tres funciones que la literatura documenta de forma independiente pero que, en el caso boliviano, resultan complementarias: a) almacenamiento estacional de energía renovable, b) insumo de descarbonización para sectores industriales y de transporte pesado de difícil electrificación

directa, y c) potencial vector de exportación energética. Esta convergencia responde directamente a las dos problemáticas identificadas en la introducción, el crecimiento sostenido de la demanda energética y la urgencia climática. La pregunta relevante para Bolivia no es si el hidrógeno verde resulta pertinente en este contexto, sino bajo qué condiciones técnicas, económicas y normativas su despliegue se vuelve viable a la escala que el país requiere.

El análisis de los hallazgos técnicos (Eje 2) frente a los conceptuales (Eje 1) revela una tensión productiva del sistema, si bien el marco teórico revisado atribuye al hidrógeno verde un rol estratégico casi indiscutido para la transición energética, la evidencia técnico-económica, se ve fuertemente limitado por dos factores: una eficiencia sistémica que rara vez supera el 20 % y los costos de producción que aún duplican o triplican los del hidrógeno gris. Esta discrepancia entre el discurso normativo sobre la urgencia de la transición y la madurez tecnológica real disponible es consistente con la literatura internacional sobre tecnologías emergentes de energía limpia, y sugiere que las políticas públicas bolivianas deberían evitar sobreestimar los plazos de rentabilidad comercial de la electrólisis solar a gran escala.

Por otra parte, la confrontación entre el Eje 2 y el Eje 3 evidencia que las barreras que limitan el aprovechamiento del potencial solar altiplánico no son predominantemente técnicas, sino son del tipo económicas e institucionales. Esto se respalda por los hallazgos de los estudios en contextos regionales similares (Dominguez et al., 2026; Chasiluisa et al., 2022), que demuestran la viabilidad técnica de desplazar los combustibles fósiles mediante el aprovechamiento de los recursos solares, el caso boliviano requiere, adicionalmente, resolver vacíos regulatorios y de infraestructura que en esos contextos de referencia se encontraban comparativamente más consolidados. La novedad que aporta esta revisión respecto de la literatura previa, centrada mayoritariamente en contextos europeos, norteafricanos o de Medio Oriente, radica precisamente en trasladar el análisis técnico y económico de la electrólisis solar a un territorio con alta irradiación pero con una institucionalidad energética todavía en construcción, lo que constituye un aporte

pertinente para la línea de investigación sobre transiciones energéticas en economías emergentes dependientes de hidrocarburos.

En términos de aplicación práctica, los hallazgos sugieren que el diseño de proyectos piloto en el Altiplano boliviano debería priorizar tecnologías de electrólisis alcalina para aplicaciones de carga base, dado su menor costo de inversión y mayor madurez comercial, reservando la tecnología PEM para aplicaciones que exijan una respuesta dinámica frente a la variabilidad de la irradiación. Esta recomendación, sin embargo, debe entenderse con la cautela que amerita el diseño de una revisión de literatura, se trata de una generalización pensada a partir de evidencia obtenida mayoritariamente en otros contextos geográficos, y no de una validación empírica específica para las condiciones altiplánicas.

5. CONCLUSIÓN

1. **Primera conclusión:** La revisión de la literatura permite sostener que Bolivia dispone de condiciones de irradiación solar excepcionales, particularmente en la región del Altiplano, estas condiciones la posicionan como un territorio con potencial para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis fotovoltaica. Sin embargo, este potencial físico coexiste con limitaciones técnicas relevantes eficiencias de sistema integrado que rara vez superan el 20 % y económicas por los costos de producción de entre 2,28 y 7,39 USD por kilogramo, que mantienen al hidrógeno verde en una posición de desventaja frente al hidrógeno gris en el corto y mediano plazo.
2. **Segunda conclusión:** Del análisis de los tres ejes se desprende que la principal restricción para el aprovechamiento del potencial boliviano no reside en el recurso solar disponible ni exclusivamente en la madurez de las tecnologías de electrólisis, sino en la fragmentación del marco regulatorio, los déficits de infraestructura habilitante y la fragilidad de las cadenas de suministro de los componentes críticos. En consecuencia, la formulación de política energética nacional orientada a este vector energético debería priorizar la construcción de un marco normativo estable, antes o en paralelo a los incentivos directos a la inversión tecnológica.

3. **Tercera conclusión:** Como aporte a la línea de investigación sobre transiciones energéticas en economías emergentes, este artículo sistematiza evidencia dispersa y establece un marco analítico de tres ejes: fundamentos y contexto, tecnología, y barreras económico-regulatorias, que puede orientar estudios empíricos futuros específicos para el territorio boliviano.
4. **Cuarta conclusión:** Se identifican como futuras líneas de investigación: a) la caracterización experimental del recurso solar altiplánico bajo condiciones reales de acoplamiento con electrolizadores, b) la evaluación técnico-económica de proyectos piloto de electrólisis alcalina y PEM en emplazamientos bolivianos concretos, y c) el análisis comparado de marcos regulatorios de hidrógeno verde en economías latinoamericanas con recursos solares similares, que permita identificar buenas prácticas que sean transferibles al caso boliviano.
5. **Quinta conclusión:** Finalmente, es necesario reconocer como limitación de este estudio la escasez de investigación empírica producida específicamente sobre el territorio boliviano, lo que obligó a sustentar buena parte del análisis en evidencia de contextos análogos. Esta limitación, lejos de restar validez a los hallazgos, subraya la urgencia de una agenda público-privado de investigación aplicada que profundice en las particularidades geográficas, institucionales y económicas del país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector [El hidrógeno como vector energético]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120, Artículo 109620. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620

Algburi, S., et al. (2025). Green hydrogen role in sustainable energy transformations: A review. Results in Engineering, 26, Article 105109. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105109

Aravindan, M., Kumar, V. M., Hariharan, V. S., Narahari, T., Arun Kumar, P., Madhesh, K., Praveen Kumar, G., & Prabakaran, R. (2023). Fuelling the future: A review of non-renewable hydrogen production and storage techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 188, Article 113791. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113791

Ardo, S., Fernandez Rivas, D., Modestino, M. A., Schulze Greiving, V., Abdi, F. F., Alarcon Llado, E., Artero, V., Ayers, K., Battaglia, C., Becker, J.-P., Bederak, D., Berger, A., Buda, F., Chinello, E., Dam, B., Di Palma, V., Edvinsson, T., Fujii, K., Gardeniers, H., … Westerik, P. (2018). Pathways to electrochemical solar-hydrogen technologies. Energy & Environmental Science, 11(10), 2768–2783. https://doi.org/10.1039/C7EE03639F

Atencio, R., Sanoja-López, K. A., Luque, R., & Briceño, A. (2026). Hydrogen on the horizon: Overcoming barriers to a sustainable energy transition. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 20, 1021–1040. https://doi.org/10.1002/bbb.70090

Caldeira, R., & Infante-Moro, A. (2025). Strategic hydrogen management: Driving a sustainable energy future. Frontiers in Energy Research, 13, Article 1540396. https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1540396

Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., Braatz, R. D., Bazant, M. Z., Eikerling, M., Staffell, I., Balcombe, P., Shao-Horn, Y., & Schäfer, H. (2022). Water electrolysis: From textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. Chemical Society Reviews, 51(11), 4583–4762. https://doi.org/10.1039/D0CS01079K

Detz, R. J., Reek, J. N. H., & van der Zwaan, B. C. C. (2018). The future of solar fuels: When could they become competitive? Energy & Environmental Science, 11(7), 1653–1669. https://doi.org/10.1039/C8EE00111A

Dominguez, J., Quijano, R., & Quijano-Baron, J. (2026). MODERHydrogen-H2: A GIS-Based Framework for Integrating Green Hydrogen into Colombia's Energy Transition. Sci, 8(2), 37. https://doi.org/10.3390/sci8020037

Efenwengbe Nicholas Aminaho, Ndukaegho Sabastine Aminaho, Faith Aminaho (2025) Techno-economic assessments of electrolyzers for hydrogen production, Applied Energy, Volume 399,126515, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126515

Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(6), 4141–4147. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.048

Franco, A., & Giovannini, C. (2023). Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives. Sustainability, 15(24), 16917. https://doi.org/10.3390/su152416917

Grube, T., Reul, J., Reuß, M., Calnan, S., Monnerie, N., Schlatmann, R., Sattler, C., Robinius, M., & Stolten, D. (2020). A techno-economic perspective on solar-to-hydrogen concepts through 2025. Sustainable Energy & Fuels, 4(11), 5818–5834. https://doi.org/10.1039/d0se00896f

Hossain Bhuiyan, M. M., & Siddique, Z. (2025). Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation. International Journal of Hydrogen Energy, 102, 1026–1044. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.033

Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2020). Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. International Journal of Energy Research, 44, 4110–4131. https://doi.org/10.1002/er.4930

Ma, H., Sun, Z., Xue, Z., & Zhang, C. (2023). A systemic review of hydrogen supply chain in energy transition. Frontiers of Engineering Management, 17(1), 102–122. https://doi.org/10.1007/s11708-023-0861-0

Martens JA (2024) The bright future of solar-driven hydrogen production. Front Sci 2:1532051. https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1532051

Martinez Lopez, V. A., Ziar, H., Haverkort, J. W., Zeman, M., & Isabella, O. (2023). Dynamic operation of water electrolyzers: A review for applications in photovoltaic systems

integration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 182, 113407. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113407

Matthew R. Shaner, Harry A. Atwater, Nathan S. Lewis, Eric W. McFarland; A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy. *Energy Environ. Sci.* 2016; 9 (7): 2354–2371. https://doi.org/10.1039/c5ee02573g

Mir, I.A., Rana, S., Miao, B. et al. Engineering an AgZnInS@ZnS/g-C_3N_4 hybrid heterostructure for enhanced green hydrogen production. Commun Chem (2026). https://doi.org/10.1038/s42004-026-02171-8

Montenegro, A. R., Sanjuan, M., & Carmona, M. (2019). Energy Storage Development using Hydrogen and its Potential Application in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(6), 254–268. Retrieved from https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/8294

Nasser M, Megahed TF, Ookawara S, Hassan H. A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. Environ Sci Pollut Res Int. 2022 Dec;29(58):86994-87018. doi: 10.1007/s11356-022-23323-y. Epub 2022 Oct 25. PMID: 36280638; PMCID: PMC9671993.

Nnabuife, S. G., Hamzat, A. K., Whidborne, J. F., Kuang, B., & Jenkins, K. W. (2024). Integration of renewable energy sources in tandem with electrolysis: A technology review for green hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy, 107, 218–240. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.342

Padrón-Andrade, G., Pesántez-Gahuancela, E. ., & Ochoa-Correa, D. (2026). Pathway to Solar Green Hydrogen: A Literature Review of Technologies, Efficiency, and Economic Feasibility. InGenio Journal, 9(1), 60–86. https://doi.org/10.18779/ingenio.v9i1.1203

Padrón-Andrade, G., Pesántez-Gahuancela, E., & Ochoa-Correa, D. (2026). Camino al hidrógeno verde solar: revisión literaria de tecnologías, eficiencia y viabilidad económica. *InGenio Journal*, *9*(1), 60–86. https://doi.org/10.18779/ingenio.v9i1.1203

Parkinson, B., Tabatabaei, M., Upham, D. C., Ballinger, B., Greig, C., Smart, S., & McFarland, E. (2018). Hydrogen production using methane: Techno-economics of decarbonizing fuels and chemicals. International Journal of Hydrogen Energy, 43(5), 2540–2555. doi.org Princeton University

Parolin, F., Colbertaldo, P., & Campanari, S. (2022). Development of a multi-modality hydrogen delivery infrastructure: An optimization model for design and operation, Energy Conversion and Management, Volume 266, 2022, 115650, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115650

Quishpi Chasiluisa Noemi Tatiana, Córdova Rafael Alexander, and Echeverría Magdy Mileni (2022). Hydrogen Fuel Cells and Their Potential to Fight Climate Change, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador, https://orcid.org/0000-0002-5326-3782

Raab, M., Körner, R., & Dietrich, R.-U. (2022). Techno-economic assessment of renewable hydrogen production and the influence of grid participation. International Journal of Hydrogen Energy. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.038

Sadeq, A. M., Homod, R. Z., Hussein, A. K., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H. F., Patil, A. R., & Moghaddam, A. H. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects, Science of The Total Environment, Volume 939, 173622, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622

Shaner, M. R., Atwater, H. A., Lewis, N. S., & McFarland, E. W. (2016). A comparative technoeconomic analysis of renewable hydrogen production using solar energy. Energy & Environmental Science, 9, 2354–2371. https://doi.org/10.1039/C5EE02573G

Taoufik Brahim, Abdelmajid Jemni (2026). Green hydrogen production: A review of technologies, challenges, and hybrid system optimization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 225, 2026, 116194, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116194.

Terlouw, T., Bauer, C., McKenna, R., & Mazzotti, M. (2022). Large-scale hydrogen production via water electrolysis: A techno-economic and environmental assessment. *Energy & Environmental Science*, *15*, 3583–3602. https://doi.org/10.1039/d2ee01023b

Vargas Yumayuza, C. A., Duarte Castillo, A. E., & Franco Bedoya, Ó. (2025). Toma de decisiones en la cadena de suministro de hidrógeno verde: un mapeo sistemático de literatura. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI (EIEI ACOFI), Cartagena, Colombia. https://doi.org/10.26507/paper.4393

Yates, J., Daiyan, R., Patterson, R., Egan, R., Amal, R., Ho-Baille, A., & Chang, N. L. (2020). Techno-economic Analysis of Hydrogen Electrolysis from Off-Grid Stand-Alone Photovoltaics Incorporating Uncertainty Analysis, Cell Reports Physical Science, Volume 1, Issue 10, 100209, ISSN 2666-3864, https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100209

Younus, H. A., Al Hajri, R., Ahmad, N., et al. (2025). Green hydrogen production and deployment: Opportunities and challenges. Discover Electrochemistry, 2, Article 32. https://doi.org/10.1007/s44373-025-00043-9

Zhang, C., Yuan, X., Fei, H., Ju, M., Wang, H., Zhang, Y., Wang, S., Wang, Z., Lei, J., Chen, G., Huang, Y., & Wang, J. (2025). Efficiently coupling water electrolysis with solar PV for green hydrogen production, Energy Reviews, Volume 4, Issue 3, 100151, ISSN 2772-9702, https://doi.org/10.1016/j.enrev.2025.100151

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con la investigación, su desarrollo o la publicación del presente artículo. Asimismo, declaran que el manuscrito es original y que no ha sido publicado previamente, ni se encuentra sometido simultáneamente a evaluación en otra revista.

FINANCIAMIENTO

Los autores declaran que no recibieron financiamiento externo para el desarrollo de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA:

Autores e iniciales: Ariel Rey Villca Pozo (ARVP), Wilson Ángel Gutiérrez Rodríguez (WAGR), Zulema Conto Quispe (ZCQ), Wilson Iván Gutiérrez Peña (WIGP).

1. Planteamiento de la idea: ARVP, WAGR y ZCQ.
2. Estructuración metodológica: ARVP, WAGR, ZCQ y WIGP.
3. Levantamiento y gestión de información: ARVP, WAGR y ZCQ.
4. Sistematización de datos: ARVP, WAGR, ZCQ y WIGP.
5. Procesamiento e interpretación de resultados: ARVP, WAGR, ZCQ.
6. Verificación de la información: ARVP, WAGR, ZCQ y WIGP.
7. Elaboración de recursos visuales: ARVP, WAGR y ZCQ.
8. Coordinación del estudio: ARVP, WAGR, ZCQ y WIGP.
9. Redacción inicial del manuscrito: ARVP, WAGR, ZCQ y WIGP.
10. Corrección académica y edición final: ARVP, WAGR, ZCQ y WIGP.
11. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.