

Artículo Científico

Estudio de factibilidad para la implementación de la agrovoltáica en Bolivia.

Feasibility study for the implementation of agrovoltaic in Bolivia

Bryan Didson Montaño Mariscal¹¹. Ingeniero eléctrico. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. b.montanom64@gmail.com

RESUMEN

La quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, es uno de los factores causantes de fenómenos climáticos como granizos, sequías e inundaciones que generan pérdidas en producciones agrícolas, además, es factor que afecta a la salud de la sociedad en general. A lo largo del mundo entero se comenzó a plantear políticas que impulsan la producción de energía eléctrica a través de fuentes renovables y amigables con el medio ambiente. Bolivia no ha quedado al margen de esas políticas donde la Empresa Nacional De Electricidad se ha trazado como objetivo el cambio de matriz energética, buscando que la mayor parte de la energía que llega a los hogares bolivianos provenga de fuentes renovables. La agrovoltáica es una técnica innovadora que integra la producción de energía solar fotovoltaica y la agricultura en una misma superficie de terreno. Este enfoque estratégico utiliza estructuras elevadas o sombreadas para los paneles, lo que no solo genera electricidad, sino que también crea un microclima beneficioso para los cultivos al protegerlos del estrés térmico y reducir la evapotranspiración. El objetivo es optimizar el uso del suelo, permitiendo la coexistencia y sinergia de ambas actividades, lo que contribuye a una producción agrícola más resiliente y eficiente. Por ello es que se considera un aporte más que ayuda para lograr el cambio de matriz energética. Por la capacidad instalada en el sistema agrovoltáico, para el análisis de costos de producción y el análisis de factibilidad desarrollado en los nueve departamentos de Bolivia, se rige a las condiciones, reglamentos y normativas establecidas en el decreto supremo N° 5167 para generación distribuida, tomando en cuenta para el análisis la categoría general 1 de la estructura tarifaria vigente establecida para cada distribuidor en cada departamento.

Citar como: Montaño Mariscal, B.D. Estudio de factibilidad para la implementación de la agrovoltáica en Bolivia. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(58) 6-21. <https://doi.org/10.52428/20758944.y21i58.1368>

Recepción: 4/07/2025

Aprobación: 24/11/2025

Publicado: 30/12/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Montaño Mariscal, B.D.. Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0. Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento. [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Palabras clave: Agrovoltáica. Fotovoltaica. Generación distribuida.

ABSTRACT

The combustion of fossil fuels for electricity generation is one of the main drivers of climate-related phenomena such as hailstorms, droughts, and floods, which cause severe losses in agricultural production. Furthermore, fossil fuel use represents a significant risk factor for public health. In response, governments around the world have introduced policies aimed at promoting electricity generation from renewable and environmentally friendly sources. Bolivia has not remained on the sidelines of these initiatives: the National Electricity Company has set the transition of the national energy matrix as a strategic objective, seeking to ensure that most of the electricity supplied to Bolivian households comes from renewable sources.

Agrovoltaics represents an innovative technique that combines solar photovoltaic energy production with agriculture on the same land surface. This strategic approach employs elevated or semi-transparent structures for photovoltaic panels, which not only generate electricity but also create a favorable microclimate for crops by mitigating thermal stress and reducing evapotranspiration. The overall objective is to optimize land use by enabling the coexistence and synergy of both activities, thereby fostering more resilient and efficient agricultural production. For this reason, agrovoltaics is considered a valuable contribution that supports the transition of the national energy matrix.

With respect to the installed capacity of agrovoltaic systems, both production cost assessments and feasibility analyses carried out across the nine departments of Bolivia are regulated by the conditions, guidelines, and standards established under Supreme Decree No. 5167 on distributed generation. These analyses are conducted in accordance with the General Category 1 of the current tariff structure, as defined for each electricity distributor in every department.

Keywords: Agrovoltaics. Photovoltaics. Distributed generation.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo en la actualidad atraviesa uno de los mayores problemas como el “calentamiento Global”, el cual perjudica a toda la humanidad (Cabrera et al., 2018; Elortegui et al., 1998). Desde hace aproximadamente 150 años atrás cuando se inició la revolución industrial, se estima que dio inicio el cambio climático, esto se lo compara bajo el argumento que a la par de la revolución industrial se incrementó la generación de gases de efecto invernadero lo que por consecuencia provocó el aumento de temperaturas que da paso al calentamiento global. Datos anteriores a la llegada de la revolución industrial, gases como el Dióxido de carbono (CO₂) se situaban en niveles relativamente bajos de modo que el planeta no presentaba cambio alguno referente a los niveles de temperatura y desertización de la tierra.

Como respuesta para contrarrestar la problemática anterior surgen las nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica a través de la biomasa, solar térmica, solar fotovoltaica, eólica y geotermia con el fin de reducir los gases contaminantes.

De esta manera el plan a nivel mundial es cambiar las tecnologías de generación de energía eléctrica que funcionan a base de combustibles fósiles a tecnología amigable con el medio ambiente (Ibarra Yomayusa, 2022).

La generación fotovoltaica se encuentra dentro de estas tecnologías amigables con el medio ambiente, se define como una fuente de energía renovable sostenible e inagotable ya que su principal fuente para generar electricidad es la radiación solar, a través del principio fotoeléctrico.

Por otro lado, la agricultura es una actividad económica desarrollada en todo el mundo cuyo fin es la producción de alimentos como vegetales, frutas, hortalizas, cereales y otros.

En Bolivia, la agricultura es una actividad económica a menudo considerada como uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de la economía del país.

Debido a la diversidad geográfica del territorio nacional, se puede considerar una gran ventaja poseer una variedad de tierras y climas.

El calentamiento global también ha llegado a afectar a esta actividad económica mediante el fenómeno de la sequía que tiene sus efectos sobre la erosión de la tierra, la falta de lluvias y las elevadas temperaturas o su contraparte lluvias intensas que generan inundaciones y fríos extremos, son efectos que impiden el desarrollo de la siembra y riego adecuado de las plantas y por consecuencia escasa o nula cosecha, lo que ocasiona daños y perjuicios en la economía de los agricultores.

La agrovoltaica surge como una propuesta novedosa para las centrales de generación fotovoltaica y los agricultores. Entre sus virtudes, ofrece una variedad de ventajas para este rubro cuyo objetivo es combatir los problemas que vienen arrastrando, ocupando espacios de producción agrícola para la generación de energía solar fotovoltaica sin perjudicar la producción agrícola y ofrecer a su vez una sombra que permita mejorar el desarrollo de los cultivos. De esta manera, mantiene la tierra húmeda, se reduce el consumo de agua y optimiza la producción (Goetzberger & Zastrow, 1981; Schindele et al., 2020).

Actualmente el país a través de la Empresa Nacional de Electricidad, ENDE, tiene como objetivo el cambio de matriz energética, lo que representa que se busca generar la mayor cantidad de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Una alternativa más para alcanzar ese objetivo es que surge la Generación distribuida, regulada por normas y Decretos tales como el 4477 y el 5167. Este conjunto de cambios que se generan en el país, da pie al desarrollo de nuevas estrategias para la incorporación de sistemas de generación amigables con el medio ambiente, es así como se plantea que el presente estudio.

Se estima que desarrollar agrovoltaica como sistema de generación distribuida, ayuda a fomentar el estudio y la convivencia de ambas áreas (agrícola y generación fotovoltaica) de forma sinérgica, además, impulsa la implementación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red (generadores distribuidos).

2. METODOLOGÍA

2.1 Relevamiento de información

El estudio de la investigación tomó un enfoque mixto porque se requiere inicialmente estudiar y poseer sólidos conceptos y fundamentos sobre agrovoltaica, para posteriormente desarrollar el diseño y dimensionamiento de un sistema agrovoltaico conectado a la red (generador distribuido) que brinde las condiciones adecuadas y óptimas para el beneficio del desarrollo de la producción agrícola y la producción de energía eléctrica garantizando el cumplimiento de las normas.

El estudio busca impulsar la convivencia en armonía de dos rubros como la agricultura y la generación de energía solar, debido a la evidencia obtenida, el área estudiada es relativamente nueva, por lo que se recurrió plenamente al análisis documental científico encontrado para estudiar los conceptos y fundamentos de mencionada técnica (agrovoltaica). Inicialmente se buscó antecedentes de estudio de agrovoltaica en el territorio nacional (Bolivia), desafortunadamente no se logró encontrar estudios previos en el territorio nacional. Seguidamente se exploró las evidencias científicas que existen a nivel mundial.

Fue importante recolectar información sobre agricultura en Bolivia, saber cómo se desarrolla esta actividad económica en nuestro país, el alcance que tiene y la importancia que representa. También se usó información disponible sobre sobre la generación solar fotovoltaica, el impacto global que ha tenido y el estado de avance que ha tenido en el país en los últimos años.

2.2 Sistemas agrovoltáicos

Los sistemas agrovoltáicos, son sistemas que combinan la producción de energía solar con la agricultura, ganadería o apicultura. Estos sistemas se basan en la idea de que los paneles solares pueden proporcionar sombra y protección a los cultivos, animales y panales de abejas mejorando su rendimiento y productividad. La idea de combinar la energía solar fotovoltaica con la producción agrícola, conocida como agro voltaica, surgió por primera vez en 1981 de la mano de Armin Zastrow y Adolf Goetzberger, fundador del Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (ISE), pero el concepto de agricultura agrovoltáica comenzó a popularizarse sino hasta la década pasada, gracias a los estudios de rendimiento realizados por el francés Christophe Dupraz.

Finalmente, se engloba los conocimientos ya descritos para poder comprender de manera clara los conceptos del tema central (la agrovoltáica), y realizar el estudio requerido, de esta manera se logra cumplir satisfactoriamente los objetivos trazados en el presente estudio.

Dimensionamiento y diseño del sistema agrovoltáico

Para el dimensionamiento se debe elegir el tipo de cultivo sobre el cual se aplicará agrovoltáica, a continuación, se presenta un listado de cultivos que se benefician al recibir determinado grado de sombra durante su desarrollo:

Tabla 1. Selección de cultivo

CULTIVO	ZONAS PRODUCTORAS	REQUERIMIENTO HÍDRICO (L/m ² -día)	CONDICIONES CLIMÁTICAS	TECHO FOTOVOLTAICO (%)
Maíz	Cochabamba y Santa Cruz	8000	Húmedo	20
Pimiento	Santa Cruz y Cochabamba	5000	Húmedo, cálido	22
Lechuga	La Paz y Cochabamba	3000	Templado, húmedo	20
Frutilla	Cochabamba, Santa Cruz y Tarija	2080	Húmedo, templado	25
Tomate	Cochabamba, Santa Cruz y Tarija	3500	Húmedo, cálido	10
Flores	Cochabamba	3000	Húmedo, cálido	20

Fuente: elaboración propia 2024.

La producción de frutilla presenta tres técnicas que permiten su producción una mejor que la otra en cuanto se refiere a temas de rendimiento agrícola. La producción tradicional que posee un elevado riesgo de pérdida de la producción por fenómenos climáticos, producción en macrotúneles que busca conservar la humedad de la tierra del cultivo al ser recubierta con plásticos y finalmente la producción en invernaderos que busca mejorar el rendimiento agrícola; controla la temperatura dentro el invernadero, la humedad y además brinda protección ante posibles eventos de fenómenos climáticos que puedan llegar a dañar el cultivo afectado a la producción. Para la aplicación de agrovoltáica se selecciona la aplicación en invernaderos por lo que se debe elegir el diseño de invernadero adecuado.

Entre los diseños de invernaderos se debe buscar el que permita la implementación de paneles solares sobre la estructura con la capacidad de soportar esfuerzos de carga por viento y el peso de los paneles sin que afecte su integridad.

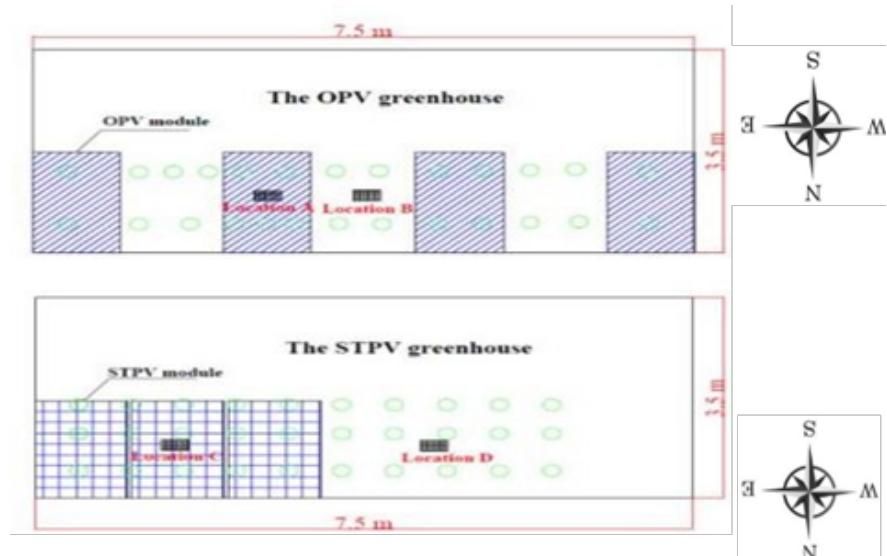
Tabla 2. Selección de estructura

INVERNADERO	RESISTENCIA DE CARGAS ESTÁTICAS	RESISTENCIA DE CARGAS DINÁMICAS (VIENTOS)
	Cargas ligeras	Ligeros
	Cargas pesadas	Fuertes
	Cargas relativamente pesadas	Fuertes

Fuente: elaboración propia 2024.

Definido la estructura, se debe buscar la distribución de paneles adecuada que permita incrementar el rendimiento agrícola con la aplicación de sombra en el área y además obtener un óptimo rendimiento eléctrico para la generación.

Tabla 3. Diseños de distribución de módulos solares OPV (Organic Photovoltaic) y STPV (Semi-Transparent Photovoltaics) estudiados.



Nota. En el estudio, los módulos solares deben ser ubicados en dirección norte dentro en territorio boliviano. Fuente: revista científica Sustainability.

Según Yilian Tang, Ming Li* y Xun Ma, en su artículo “Study On Photovoltaic Modules On Greenhouse Roof For Energy And Strawberry Production” publicado en 2019 se evidencia que la mejor configuración de la que se obtiene mejora en el rendimiento agrícola de la frutilla, ya que se aprovecha la radiación indirecta, y también buen rendimiento eléctrico, pues permite una mayor capacidad de potencia instalada en paneles. Esta es la configuración OPV..

Potencia instalada.

La potencia instalada dependerá de la cantidad de paneles solares que se pueda instalar sobre el techo de los invernaderos en determinada área de terreno, respetando el requerimiento de sombra de la configuración OPV (25% del techo). Para efectos del estudio se considera un terreno de una hectárea (1 ha), donde los invernaderos poseen un largo de 100 metros, ancho de 3,5 metros y se encuentran separados por 2 metros uno del otro. Conociendo las dimensiones del invernadero se debe dividir el largo (100 metros) en espacios iguales, de tal modo que en cada espacio entre un panel.

$$Espacios = \frac{\text{largo del invernadero}}{1,25 m}$$

$$Espacios = \frac{100 m}{1,25 m}$$

$$Espacios = 80$$

Después de elegir el panel para el estudio, se conoce que las dimensiones (1762x1134x30 mm) permite su montaje en el espacio de 1,25 m. De los 80 espacios que se menciona (el 50% del techo), ubicados con la cara al norte, solo se debe disponer de la mitad (40 espacios) con ello se cumple la configuración OPV que sugiere el ocupar el 25% del techo del invernadero.

Por lo que se puede realizar el montaje de 40 paneles en cada invernadero, sabiendo que existen 12 invernaderos en el terreno (con una separación de 2 metros entre cada invernadero), se puede tener un total de 480 paneles instalados en una hectárea de terreno sobre el techo de los invernaderos los invernaderos. La tecnología empleada en paneles fotovoltaicos posee una potencia pico máxima de 435 W como datos de placa, por lo que la potencia instalada será:

$$P_{instalada} = \text{Números de paneles} * P_{panel}$$

$$P_{instalada} = 480 * 435$$

$$P_{instalada} = 208.800 \text{ W}$$

$$P_{instalada} = 208,80 \text{ kW}$$

Los paneles solares y la instalación fotovoltaica presentan diferentes fenómenos que producen pérdidas en la producción de energía eléctrica las que deben ser consideradas en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico -tales como pérdidas por temperatura, pérdidas por polución, las cuales representan un 15% de la potencia instalada, pérdidas en el inversor, pérdidas en el conductor- para obtener la potencia real final instalada.

Para seleccionar el inversor correcto se considera la potencia máxima que permite conectar en los bornes del inversor y, además, debe considerarse un equipo que permita conexión a la red, por ello es que se elige un inversor de red.

Tabla 4. Potencia disponible

Potencia instalada		208,80 kW
Pérdida por suciedad	15%	31,32 kW
Pérdida por temperatura		3,15 kW
Potencia que llega al <u>inversor</u>		174,33 kW
Pérdidas en el inversor	2%	3,49 kW
Pérdidas en el cable		0,36 kW
Potencia final		170,48 kW

Nota: La potencia instalada, es aquella que se presenta cuando en un caso ideal.

El costo de la inversión que se requiere para la implementación de la tecnología solar fotovoltaica aplicado para agrovoltaica se analiza con datos de proveedores a nivel nacional (Enersol).

Tabla 5. Presupuesto estimado al 2024.

ELEMENTOS Y MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO (\$)
PANELES (20 AÑOS)	480 PANELES		62.400,00 \$
INVERSORES (20 AÑOS)	12 INVERSORES		33.600,00 \$
ESTRUCTURAS (50 AÑOS)	12 ESTRUCTURAS		240.000,00 \$
MANTENIMIENTO DE PANELES (MENSUAL)	1 MANTENIMIENTO		540,00 \$
TECNICOS (INCLUYE ALIMENTACIÓN Y ROPA DE TRABAJO)	6 TECNICOS		5.900,00 \$
INGENIERO (INCLUYE ALIMENTACIÓN Y ROPA DE TRABAJO)	1 PERSONA		30.000,00 \$
MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS (SEMESTRAL)	1 MANTENIMIENTO		200,00 \$
PERSONAL PARA EL MANTENIMIENTO DE PANELES (MENSUAL) PERSONAL	2 PERSONAS		510,20 \$
PARA EL MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS (SEMESTRAL)	1 PERSONA		510,20 \$
EQUIPOS DE MANTENIMIENTO (SENSORES, TESTER, PINZA AMPIRIMETRICA,	1 GENERAL		600,00 \$
CABLES, CONECTORES, CAJAS DE CONEXIÓN, FUSIBLES (5 AÑOS)	1 GENERAL		9.000,00 \$
MEDIDOR BIDIRECCIONAL (50 AÑOS)	1 MEDIDOR		900,00 \$
COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO TOTAL			4.861.449,60 \$

Fuente: Enersol

El sistema diseñado y dimensionado es replicado en cada uno de los nueve departamentos de Bolivia para la producción de frutilla. Para calcular la energía que este sistema produce en cada región se debe considerar el ángulo óptimo de los paneles y los datos de radiación solar promedio en cada departamento.

2.4 Generación distribuida

Es importante conocer sobre lo que significa generación distribuida en el país porque el diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico, que es parte del estudio de agrovoltaica, está pensado para que ser incorporado en ese rubro, un sistema conectado a la red.

La generación distribuida es un concepto relativamente nuevo en el territorio nacional definida como la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables a pequeña o mediana escala cerca de los puntos de consumo con la posibilidad de inyectar la energía excedente a la red. Se rige por los decretos supremos 4477 y el 5167.

En el 5167 define que el método de retribución económica por la inyección de energía a la red, aplicable en el territorio nacional, es el método Net Metering, conocido como la medición neta de energía. Esto significa que al final de cada mes, se realiza un balance entre la energía inyectada y la energía consumida de la red y la diferencia es el saldo a pagar al distribuidor de acuerdo a la categoría en la cual se tiene el contrato suscrito con el mismo.

Para el análisis de costos y estudio de factibilidad, se toma en cuenta la estructura tarifaria actual vigente de la AE, la Autoridad de Electricidad, y de los distribuidores de cada departamento, en la categoría general 1. Además, se estima el costo de la tecnología agrovoltaica requerida planteada en el diseño y dimensionamiento, misma que se replicará en cada uno de los 9 departamentos

para posteriormente determinar la capacidad de producción del sistema fotovoltaico de acuerdo a los datos de radiación propios del departamento en cuestión.

3. RESULTADOS

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos del análisis de producción y el estudio de factibilidad para la implementación del sistema agrovoltaico (dimensionado) en los nueve departamentos de Bolivia. Las siguientes figuras y tablas detallan la radiación solar, las horas pico de sol, la producción energética, los costos de la energía y el análisis de viabilidad financiera.

La Tabla 6 muestra los datos de radiación solar promedio anual de los departamentos de Bolivia. Estos datos, obtenidos de la base de datos de la NASA, son fundamentales para estimar el potencial de generación de energía solar en cada región.

3.1 Radiación por departamento

Radiación Promedio mensual (kWh/m² dia) del 2013 a 2023

Mes	Cochabamba	Pando	Beni	Santa cruz	La Paz	Oruro	Potosí	Chuquisaca	Tarija
Enero	174,68	143,66	153,06	176,89	166,51	196,51	223,65	172,06	169,03
Febrero	152,22	122,35	131,43	152,74	151,61	176,72	207,68	152,03	144,38
Marzo	173,96	141,05	151,21	164,61	173,52	206,25	241,64	169,53	153,32
Abril	178,40	144,15	154,71	152,15	171,51	203,69	235,38	174,62	149,58
Mayo	184,88	147,06	144,60	127,61	178,55	201,54	229,93	192,63	154,33
Junio	173,71	145,72	138,58	116,28	163,48	187,79	207,16	182,99	156,56
Julio	188,78	167,89	160,94	138,61	177,47	198,65	222,60	195,70	175,92
Agosto	199,32	178,82	177,20	169,42	191,91	215,31	242,41	206,07	200,67
Septiembre	200,64	177,18	180,78	174,98	188,82	226,98	248,60	201,37	189,80
Octubre	204,38	169,90	178,42	179,19	194,81	236,09	263,85	199,09	180,51
Noviembre	187,31	148,86	158,04	169,51	181,76	223,16	249,63	184,87	166,04
Diciembre	172,48	142,74	152,04	168,98	165,22	199,39	236,62	170,35	161,42
Promedio Anual (kWh/m ²)	182,56	152,45	156,75	157,58	175,43	206,01	234,10	183,44	166,80

Fuente: Base de datos meteorológicos de la NASA.

3.2 Análisis de producción

La siguiente tabla, ilustra las Horas Solares Pico (HSP) promedio por departamento. Este valor, calculado con los datos de radiación de la NASA, es un indicador clave para el dimensionamiento y la estimación de la producción de energía eléctrica del sistema agrovoltaico.

Horas solar pico promedio mensual (hrs)

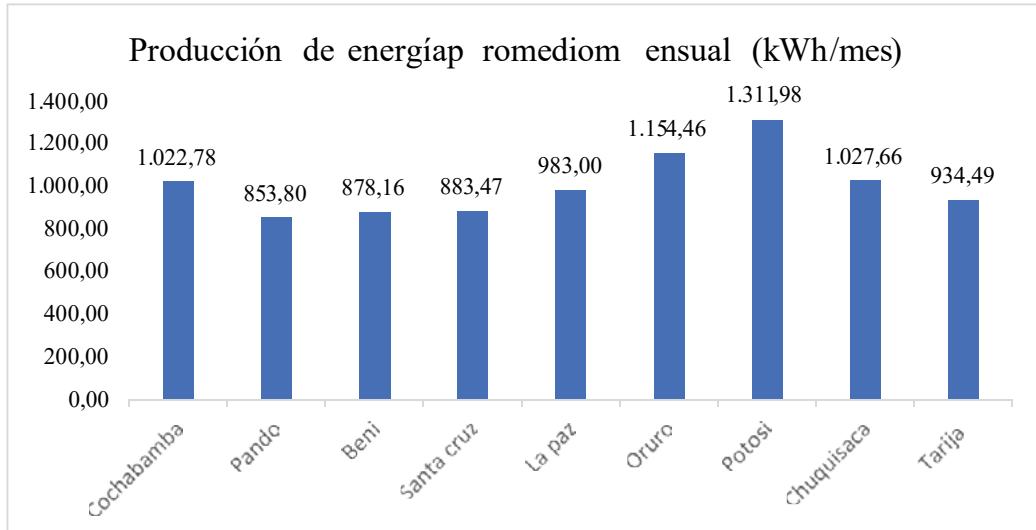
Mes	Cochabamba	Pando	Beni	Santa Cruz	La Paz	Oruro	Potosí	Chuquisaca	Tarija
Enero	5,63	4,63	4,94	5,71	5,37	6,34	7,21	5,55	5,45
Febrero	5,44	4,37	4,69	5,45	5,41	6,31	7,42	5,43	5,16
Marzo	5,61	4,55	4,88	5,31	5,60	6,65	7,79	5,47	4,95
Abril	5,95	4,80	5,16	5,07	5,72	6,79	7,85	5,82	4,99
Mayo	5,96	4,74	4,66	4,12	5,76	6,50	7,42	6,21	4,98
Junio	5,79	4,86	4,62	3,88	5,45	6,26	6,91	6,10	5,22
Julio	6,09	5,42	5,19	4,47	5,72	6,41	7,18	6,31	5,67
Agosto	6,43	5,77	5,72	5,47	6,19	6,95	7,82	6,65	6,47
Septiembre	6,69	5,91	6,03	5,83	6,29	7,57	8,29	6,71	6,33
Octubre	6,59	5,48	5,76	5,78	6,28	7,62	8,51	6,42	5,82
Noviembre	6,24	4,96	5,27	5,65	6,06	7,44	8,32	6,16	5,53
Diciembre	5,56	4,60	4,90	5,45	5,33	6,43	7,63	5,50	5,21
Promedio Anual (hrs)	6,00	5,01	5,15	5,18	5,77	6,77	7,70	6,03	5,48

Fuente: elaboración propia con datos extraídos de la base de datos de la NASA

3.3 Producción de energía por departamento

A continuación, se presenta la producción de energía estimada por departamento, la cual se basa en el dimensionamiento del sistema agrovoltaico y las horas solares pico promedio de cada región. Esta tabla, elaborada por el autor, muestra la capacidad de generación eléctrica anual en cada Departamento.

Figura 1. Cuadro comparativo de producción de energía por departamento.



Nota. Para estimar la energía, se emplea los datos de dimensionamiento desarrollado en el apartado 2.3, posteriormente se aplica los datos de horas sol pico propio de cada departamento para obtener la energía generada. Fuente: elaboración propia.

3.3 Costo de la energía por departamento

Los datos de la siguiente tabla son un elemento crucial para el análisis de factibilidad económica, permitiendo una comparación directa con los costos de producción del sistema propuesto y los costos de energía de la empresa distribuidora de cada departamento. Esta tabla ha sido elaborada por el autor.

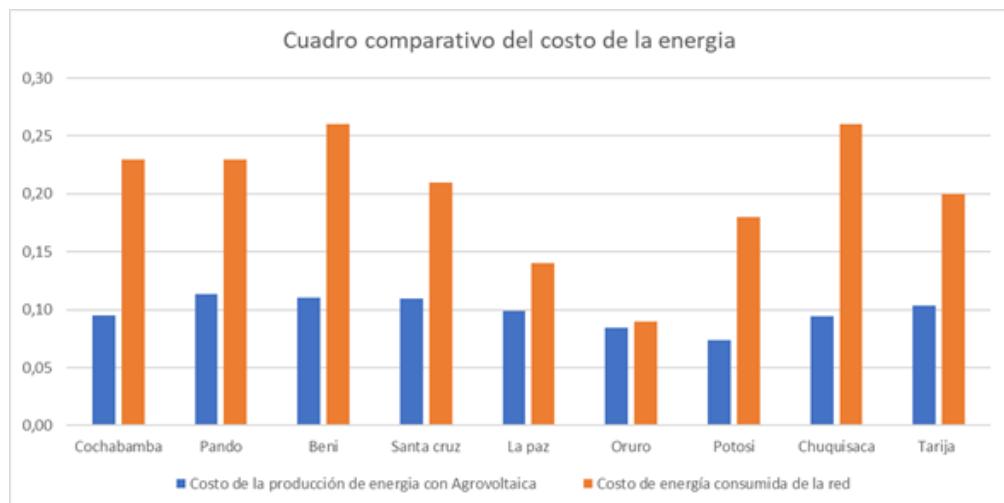
Tabla 9. Análisis de Costos por departamento.

Mes	Cochabamba	Pando	Beni	Santa Cruz	La Paz	Oruro	Potosí	Chuquisaca	Tarija
COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60	4.861.449,60
TOTAL (\$)	7.466.271,19	6.232.729,27	6.410.538,12	6.449.307,85	7.175.873,84	8.427.564,99	9.577.420,54	7.501.895,92	6.821.813,29
ENERGÍA GENERADA A 20 AÑOS(kWh)									
COSTO DE PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA (\$/kWh)	0,09	0,11	0,11	0,11	0,10	0,08	0,07	0,09	0,10
COSTO DE LA ENERGÍA EN EL DISTRIBUIDOR (\$/kWh)	0,23	0,23	0,26	0,21	0,14	0,09	0,18	0,26	0,20

Fuente: elaboración propia.

Se presenta un cuadro comparativo entre los costos de producción del sistema agrovoltaico y el costo de la energía consumida de la red en cada departamento. Esta tabla, permite evaluar la rentabilidad del proyecto en cada región.

Figura 2. Cuadro comparativo de costos de producción vs costo de la energía consumida de la red.



Nota. La imagen muestra el costo de producción con agrovoltaica sin considerar intereses por financiamiento bancario. Fuente: elaboración propia.

3.5 Factibilidad por departamento

Considerando un financiamiento del 70% del proyecto, con una tasa de interés del 8% a plazo de 20 años.

Tabla 10. Factibilidad de financiamiento del proyecto.

	Condiciones actuales				Condiciones Necesarias				
	Costo de Producción (\$/kWh)	Costo de la energía (\$/kWh)	TIR (%)	VAN (\$)	Factibilidad	Costo de la energía (\$/kWh)	TIR (%)	VAN (\$)	Factibilidad
Cochabamba	0,09	0,23	12,00	67.252,00	SI				
Pando	0,11	0,23	9,00	-32.373,00	NO	0,26	11,00	26.432,00	SI
Beni	0,11	0,26	11,00	28.568,00	SI				
Santa Cruz	0,11	0,21	8,00	-9.538,00	NO	0,27	11,00	41.228,00	SI
La Paz	0,09	0,14	4,00	-227.549,00	NO	0,23	11,00	22.657,00	SI
Oruro	0,08	0,09	2,00	-303.524,00	NO	0,20	11,00	51.947,00	SI
Potosí	0,07	0,18	11,00	32.132,00	SI				
Chuquisaca	0,09	0,26	13,00	127.886,00	SI				
Tarija	0,10	0,20	7,00	-129.690,00	NO	0,26	11,00	34.214,00	SI

Nota: en los departamentos que no es factible su implementación (bajo las condiciones actuales), de acuerdo a la normativa establecida en el decreto supremo 5167 para la retribución económica, requiere (condiciones necesarias) que la tarifa por energía consumida de la red incremente, de esa manera se tiene una alternativa para lograr la factibilidad en los departamentos que así lo requieren.

Se expone los resultados del análisis de factibilidad para cada departamento, considerando un escenario de financiamiento. Esta tabla, elaborada por el autor, detalla la viabilidad económica del proyecto en función de las condiciones de financiación y los costos de la energía por departamento en base a la estructura tarifaria de cada empresa distribuidora.

4. DISCUSIÓN

En el estudio se concluye que es posible la implementación de sistemas agrovoltaicos en el país, considerando que existe potencial productivo en diferentes tipos de cultivos que son compatibles con agrovoltaica. Además, la normativa actual de generación distribuida permite encontrar ciertos beneficios para implementar estos sistemas en el territorio nacional.

Sin embargo, pese a las normas que rigen a los sistemas de generación distribuida el sistema agrovoltaico diseñado es factible en pocos departamentos y esto se debe al elevado costo de la tecnología que se requiere para su implementación.

El sistema puede llegar a ser más atractivo si:

- Implementan normas específicas (para sistemas agrovoltaicos).
- Beneficios específicos dirigidos a los productores como, por ejemplo: la retribución económica por excedentes de energía inyectada a la red, para sistemas agrovoltaicos conectados a la red se realice en forma de desembolso efectivo en moneda nacional.
- Se considera a estos sistemas para poder inyectar y retirar la energía en uno o varios puntos a partir de categorías como minigeneración.

5. CONCLUSIÓN

Se concluye que los equipos necesarios para la implementación de estos sistemas, existe en el país.

Se estudió diversas configuraciones posibles para la implementación de los invernaderos agrovoltaicos y la distribución de los paneles en los techos con la capacidad de generar energía eléctrica sin afectar de forma negativa al rendimiento de los cultivos, en base a experiencias desarrolladas en países donde ya se cuenta con estudios avanzados y plantas piloto puestas en operación. Por ello es que la configuración seleccionada es considerada por este estudio como la que mejor impulsa la sinergia y el trabajo en conjunto de la producción agrícola y la producción de energía solar fotovoltaica.

También se concluye que para la mejora de la factibilidad además del incremento de las tarifas, se debe buscar tasas de interés bancario más bajas lo que posibilitará mejorar la factibilidad o el acceso a los créditos de fomento al desarrollo de proyectos para la generación de energía eléctrica a través de fuentes de energía renovable.

7. REFERENCIAS

- Alvarado Ladrón de Guevara, J. (2019). *Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica*.
- Apaza Mamani, E. (2006). *Comportamiento agronómico de variedades de frutilla (fragaria virginiana) a diferentes densidades de plantación en la provincia sud yungas del departamento de la paz* [Tesis de grado].
- Cabrera, D., Díaz, M., Gracia, R., Hernández, C., Martel, G., Pardilla, J., Piernavieja, G., Schallenberg, J., Subiela, V., & Unamunzaga, P. (2018). *Energías renovables y eficiencia energética*.
- Colantoni, A., Monarca, D., Marucci, A., Cecchini, M., Zambon, I., Di Battista, F., Maccario, D., Saporito, G. M., & Beruto, M. (2018). Solar Radiation Distribution inside a Greenhouse Prototypal with Photovoltaic Mobile Plant and Effects on Flower Growth. *Sustainability*.
- Delgadillo Camacho, M. F., & Lazo Suárez, Á. (2015). *Diagnósticos Sectoriales Agropecuario 8. UDAPE*.
- Dupraz, C. (2019). *Study on photovoltaic modules on greenhouse roof for energy and strawberry production*.
- Elortegui, N., Fernández, J., Jarabo, F., Macias, J., & Pérez, C. (1998). *Libro de las energías renovables*. S.A.P.T.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1981). Sobre la coexistencia de la conversión de energía solar y el cultivo de plantas.
- Ibarra Yomayusa, J. (2022). *Invernaderos agrovoltaicos: desarrollo de eficiencias en el sector agrícola en Colombia*.
- Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2017). *Manual de manejo agronómico de la frutilla*.

- Kaufmann, J., Cartsburg, M., Noleppa, S., Hattermann, F., Salinas, A., & Nava, G. (2023). *Análisis costo-beneficio: Producción de frutilla con riego por goteo en la cuenca del río Guadalquivir, Tarija*.
- Liendo B., R. (2018). “Seguridad Alimentaria con Soberanía, rompecabezas entre la agricultura familiar y la agroindustria”.
- Nagashima, A. (2020). *Compartir energía solar: cambiar el mundo y la vida*.
- Muñoz Vidal, B. (2022). *Investigación y desarrollo de la optimización de la tecnología agrovoltáica en la zona de Almería*.
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., & Högy, P. (2020). Implementación de agrofotovoltaica: análisis tecnoeconómico de la relación precio-rendimiento y sus implicaciones políticas.
- Scognamiglio, A., Rizzo, A., & Picchi, P. (2021). Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns).
- Secretaría de agricultura ganadería y pesca. (2023, enero). *Producción de Frutilla en Argentina*.
- Tang, Y., Li, M., & Ma, X. (2019). Study On Photovoltaic Modules On Greenhouse Roof For Energy And Strawberry Production.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). *Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)*.
- UDAPE. (2015). *Diagnósticos Sectoriales 2015: Sector Agropecuario Tomo 8*.
- Uribe, H. (2023). *Riego en frutilla* (PDF).
- Villagran Diaz, V. (2019). *Morfología y Fisiología de la frutilla*.
- Yano, A., Kadowaki, M., Furue, A., Tamaki, N., Tanaka, T., Hiraki, E., Kato, Y., Ishizu, F., & Noda, S. (2020). Sombreado y características eléctricas de un conjunto fotovoltaico montado dentro del techo de un invernadero orientado de este a oeste.
- Zisis, C., Pechlivani, E. M., Tsimikli, S., Mekeridis, E., Laskarakis, A., & Logothetidis, S. (2019). Organic Photovoltaics on Greenhouse Rooftops: Effects on Plant Growth. *Mater. Today Proc.*

OTROS ENLACES DE INFORMACIÓN:

Agrivoltaísmo Sun’Agr. (s.f.). Recuperado de <https://sunagri.fr/es/>

Campos de Bolivia. (s.f.). Recuperado de [https://www.camposdebolivia.com/agricultura-en-bolivia/#:~:text=La%20agricultura%20tradicional%20boliviana%20refiere,\(~una%20sola%20cosecha%20anual\)](https://www.camposdebolivia.com/agricultura-en-bolivia/#:~:text=La%20agricultura%20tradicional%20boliviana%20refiere,(~una%20sola%20cosecha%20anual))

En el Green Power. (s.f.). Recuperado de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables>

Medio ambiente y Naturaleza. (s.f.). Recuperado de <https://medioambienteynaturaleza.com/energias-renovables-agricultura-agrovoltai>

REM Tec Agrovoltaiico. (s.f.). Recuperado de <https://remtec.energy/es/agrovoltaiico>

Xataka. (s.f.). Recuperado de <https://www.xataka.com/energia/agrovoltaiica-promete-ser-futuro-campo-energia-esta-ganando-terreno-espana>

NASA. (2025). Datos meteorológicos de la NASA [Base de datos]. NASA. <https://worldwind.arc.nasa.gov/worldweather/>