Diseño y evaluación de sistemas AgroPV en zonas agrícolas de Colombia*

Andrea Cusva García
Universidad de los Andes (Colombia)

Guillermo Jiménez Estévez
Universidad de los Andes (Colombia)

Jorge López Jiménez
Universidad de los Andes (Colombia)

Nicanor Quijano
Universidad de los Andes (Colombia)

Recibido: 19 de julio de 2024 | Aceptado: 30 de septiembre de 2024

Cómo citar:
Cusva, A., Jiménez, G., López, J. y Quijano, N. (2024). Diseño y evaluación de sistemas AgroPV en zonas agrícolas de Colombia. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, *10*, https://doi.org/10.53010/nys10.02



https://doi.org/10.53010/nys10.02

Resumen. En el contexto del cambio climático y el aumento de la demanda de alimentos y energía, la sostenibilidad agrícola y energética enfrenta retos económicos, logísticos y ambientales. En la producción de alimentos y energía eléctrica de manera tradicional se compite por el uso de recursos limitados como el agua y el suelo, y no se consideran factores de mitigación de su impacto ambiental. En este contexto, la sustitución de combustibles fósiles por fuentes de energía renovables se presenta como una alternativa crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La tecnología agrivoltaica (AgroPV) se posiciona como una mediadora efectiva entre los sectores energético y agrícola, al permitir el uso compartido del suelo para la producción de energía y alimentos. Esta innovación no solo incrementa la eficiencia del uso del suelo y reduce el consumo de agua, sino que también fortalece la resiliencia de los cultivos al cambio climático y ofrece una nueva fuente de ingresos para los agricultores. Por lo tanto, en este artículo se propone una metodología para el diseño de sistemas AgroPV en zonas agrícolas de Colombia, abordando la selección de la zona de estudio, su caracterización técnica y económica, la identificación de impactos, oportunidades y barreras, y su potencial de masificación. Los resultados destacan que el sistema AgroPV diseñado puede diversificar los ingresos agrícolas, contribuir a la neutralidad de carbono, aumentar la resiliencia de los cultivos ante el cambio climático, mejorar la seguridad alimentaria y optimizar el uso del suelo.

Palabras clave: agricultura, energía solar fotovoltaica, sistemas agrivoltaicos, desarrollo sostenible, resiliencia climática.

Design and evaluation of AgroPV systems in agricultural areas of Colombia

Abstract. In the context of climate change and increasing demand for food and energy, agricultural and energy sustainability faces economic, logistical, and environmental challenges. In traditional food and energy production, limited resources such as water and soil are contested, and factors to mitigate their environmental impact are not considered. In this context, replacing fossil fuels with renewable energy sources is a crucial alternative in order to reduce greenhouse gas emissions. Agrophotovoltaic technology (AgroPV) is positioned as an effective mediator between the energy and agricultural sectors, allowing the shared use of land for energy and food production. This innovation not only increases soil use efficiency and reduces water consumption but also strengthens crop resilience to climate change and offers a new source of income for farmers. Therefore, this article proposes a methodology for the design of AgroPV systems in agricultural areas of Colombia, addressing the selection of the study area, its technical and economic characterization, the identification of impacts, opportunities, and barriers, and its potential for massification. The results highlight that the designed AgroPV system can diversify agricultural income, contribute to carbon neutrality, increase crop resilience to climate change, improve food security, and optimize land use.

Keywords: agriculture, solar photovoltaic energy, agrivoltaic systems, sustainable development, climate resilience.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Projeto e avaliação de sistemas AgroPV em áreas agrícolas da Colômbia

Resumo. No contexto das mudanças climáticas e da crescente demanda por alimentos e energia, a sustentabilidade agrícola e energética enfrenta desafios econômicos, logísticos e ambientais. Na produção de alimentos e energia elétrica de maneira tradicional, há competição pelo uso de recursos limitados, como água e solo, e não se consideram fatores de atenuação de seu impacto ambiental. Nesse contexto, a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis é apresentada como alternativa crucial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. A tecnologia agrofotovoltaico (AgroPV) é posicionada como mediador eficaz entre os setores de energia e agrícola, permitindo o uso compartilhado do solo para a produção de energia e alimentos. Essa inovação não apenas aumenta a eficiência do uso da terra e reduz o consumo de água, mas também fortalece a resiliência das culturas às mudanças climáticas e oferece nova fonte de renda para os agricultores. Portanto, este artigo propõe uma metodologia para o projeto de sistemas AgroPV em áreas agrícolas da Colômbia, abordando a seleção da área de estudo, sua caracterização técnica e econômica, a identificação de impactos, oportunidades e barreiras e seu potencial de massificação. Os resultados destacam que o sistema AgroPV projetado pode diversificar a renda agrícola, contribuir para a neutralidade de carbono, aumentar a resiliência das culturas às mudanças climáticas, melhorar a seguridade alimentar e otimizar o uso do solo.

Palavras-chave: agricultura, energia solar fotovoltaica, sistemas agrofotovoltaicos, desenvolvimento sustentável, resiliência climática.

Introducción

La producción de alimentos se relaciona directamente con el uso de recursos limitados como el agua y el suelo cultivable. Estos recursos también se requieren para otras actividades como la producción de energía eléctrica, ya sea a través del uso del agua en plantas hidroeléctricas o mediante el uso del suelo para desplegar paneles fotovoltaicos. Este problema de conflicto de intereses fue definido en el World Economic Forum (2009) como el problema de Nexus entre agua, energía y alimentos, WEF Nexus, por sus siglas en inglés (*Water-Energy-Food Nexus*) (FAO, 2014). En este contexto, la sostenibilidad, uso eficiente de los recursos y la resiliencia al cambio climático plantean retos a los gobiernos de los países para satisfacer las demandas energéticas y alimentarias de sus habitantes. Por lo tanto, se propone como alternativa la sustitución de combustibles fósiles por fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).

Los sistemas fotovoltaicos en suelo (PV-GM, por sus siglas en inglés) han surgido como la fuente de generación más competitiva económicamente (IRENA, 2018). Sin embargo, la demanda creciente de PV-GM puede desencadenar un incremento en la competición por la tierra y, por ende, ocasionar conflictos de carácter social, económico, político y ambiental en el futuro. Una alternativa tecnológica con menor impacto ambiental son los llamados sistemas agrivoltaicos (APV), conocidos como AgroPV, agrovoltaicos, *solar*

https://doi.org/10.53010/nys10.02

sharing o *Solar Dual Use*, entre otros términos. Estos pueden contribuir a conciliar la seguridad alimentaria y el suministro de energía verde, al combinar en una misma área de tierra cultivos de alimentos y paneles fotovoltaicos (Dupraz *et al*., 2011a; Perna *et al*., 2019; Xue, 2017). El concepto de APV fue propuesto por primera vez por Goetzberg y Zastrow (1982), y desde entonces ha sido reconocido como una estrategia para minimizar los impactos de los sistemas fotovoltaicos (Fritsche *et al.*, 2017).

Los sistemas AgroPV consisten en paneles solares montados a más de dos metros de altura sobre el suelo, de manera que se genere un sombreado uniforme sobre el área de cultivo, para lograr una eficiencia en el uso de la tierra superior al 60%. Adicionalmente, se reduce el consumo de agua por evapotranspiración durante condiciones de sequía (Dupraz *et al*., 2011b; Marrou *et al.*, 2013). Además de generar energía, los paneles solares protegen a los cultivos del exceso de radiación y contribuyen a regular la temperatura del suelo, lo que hace que los cultivos con sistemas AgroPV sean más resilientes al cambio climático. Se ha observado que los sistemas AgroPV pueden incrementar la eficiencia en el uso del suelo y los ingresos de los agricultores en más del 30%, dependiendo de la selección del cultivo (Dinesh y Pearce, 2016). Entre los beneficios adicionales se encuentran la mitigación de los efectos de las heladas y el exceso de sol, el aumento de los ingresos agrícolas, la creación de oportunidades de empleo en las plantas fotovoltaicas y la electrificación rural descentralizada (Elamari *et al.*, 2018; Ravi *et al.*, 2016). Por consiguiente, las regiones rurales áridas o semiáridas tienen un gran potencial para la implementación del concepto AgroPV, debido a que la alta radiación solar presente amortigua los efectos adversos en los sembrados.

El concepto de AgroPV ha sido aplicado en proyectos de pequeña y mediana escala, principalmente en Europa, China, Japón, India, Estados Unidos y Chile (Elamari *et al.*, 2018; Gorjian *et al.*, 2020; Ravi *et al.*, 2016). Los sistemas AgroPV reducen significativamente el consumo de agua durante el verano y las estaciones secas, contribuyen a la conservación del suelo y a la reducción de la erosión (Weselek *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2014). Asimismo, se ha observado un incremento en la humedad del suelo entre el 10 y 20%, lo cual reduce la necesidad de irrigación de los cultivos (Hassanpour *et al.*, 2018).

Además, la implementación de sistemas AgroPV ha mejorado el valor de mercado de los productos agrícolas hasta en un 15% en comparación con los métodos de cultivo convencionales (Ai Leon y Keiichi, 2018). Finalmente, estos sistemas ofrecen la posibilidad de aumentar la seguridad e independencia energética, reducir la demanda de energía externa y las emisiones de dióxido de carbono, como se analizó en el trabajo de Cusva García (2022), contribuyendo al cumplimiento de los objetivos globales de mitigación del cambio climático y al desarrollo de un sector agrícola más sostenible y competitivo (Schindele *et al*., 2020).

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Distintos métodos han sido propuestos para el diseño óptimo de los sistemas AgroPV. Gulhane y Phadke (2023) proponen un diseño basado en lógica difusa para maximizar la superficie bajo sombra, la generación de energía y la disponibilidad de la tierra para la siembra de cultivos. Sin embargo, este enfoque no plantea esquemas de sostenibilidad ni indicadores de desempeño. A través de otras investigaciones, se ha demostrado que cultivos como la yuca, la papa dulce, el maní, la cebada, las hortalizas, el café y el té tienen tolerancia a la sombra (Elamari *et al.*, 2018; Marrou *et al.*, 2013; Singhal *et al.*, 2023). En la Figura 1 se resumen los cultivos que han sido documentados y aprobados para la implementación de sistemas AgroPV.

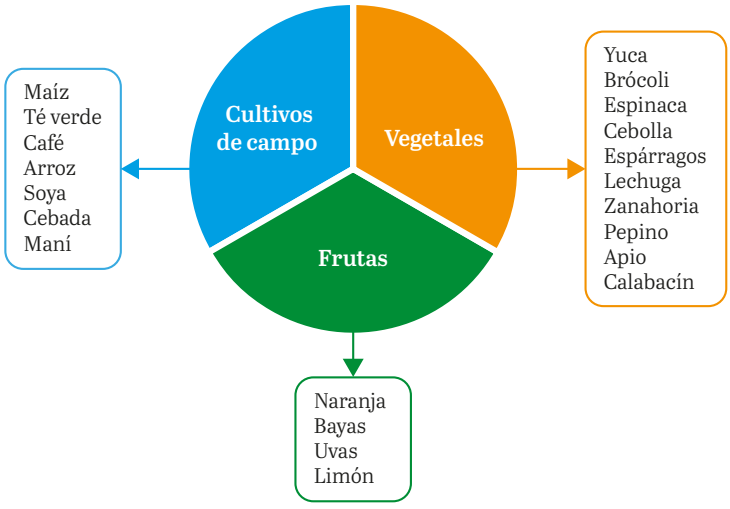


Figura 1. Cultivos potenciales para AgroPV. *Fuente:* elaboración propia.

En Colombia, el crecimiento económico está basado principalmente en su potencial agrícola y en el uso de recursos naturales (Pérez y Gamarra, 2018). Sin embargo, la actividad agrícola es una de las más contaminantes debido a la sobreutilización y abuso de la tierra cultivable, pues incluye el uso de pesticidas y fertilizantes artificiales, en adición a la dependencia de recursos energéticos fósiles.

El sector eléctrico colombiano se compone principalmente de energía hidráulica, que representa una parte significativa de su matriz energética. En 2023, el 74,15% de la generación provino de esta fuente de energía, seguida de la térmica con un 23,09%. A pesar del alto potencial de generación fotovoltaica del país, destacándose el de la Región Caribe, la participación en la matriz energética nacional de esta fuente aún es baja, representando apenas el 1,49%.

Adicionalmente, Colombia enfrenta el desafío de transitar hacia la neutralidad del carbono y fortalecer la resiliencia climática, contribuyendo al cumplimiento de uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas, 2022). Además, de acuerdo con el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC)

https://doi.org/10.53010/nys10.02

2019-2023, más de 400 000 viviendas, principalmente en zonas no interconectadas (ZNI), no cuentan con servicio eléctrico.

Para abordar los desafíos mencionados anteriormente, este artículo propone una metodología para dimensionar los sistemas AgroPV, evaluando su viabilidad en zonas agrícolas del país. Inicialmente, se realiza la selección del cultivo y la zona de estudio basándose en una revisión bibliográfica. Se identifican la región, departamento, municipio y cultivo que podrían beneficiarse con la implementación de esta tecnología.

Posteriormente, se procede al diseño del sistema, determinando aspectos técnicos como el requerimiento energético, la capacidad instalada, la estructura requerida y la estimación de la producción anual de energía eléctrica. Luego, se calculan los costos de inversión y mantenimiento, se evalúan los posibles ingresos y gastos adicionales, y se proponen modelos de negocio para analizar la sostenibilidad del sistema y la diversificación de los ingresos agrícolas.

Finalmente, se identifican los posibles beneficios, impactos (sociales, ambientales y económicos), oportunidades y limitaciones del proyecto AgroPV en la zona de estudio. Se plantean estrategias y actividades necesarias para promover la masificación de estos proyectos que integran la agricultura con la generación eléctrica, contribuyendo así a un desarrollo sostenible y climáticamente resiliente del sector agrícola en Colombia.

Metodología

La metodología propuesta adopta un enfoque *Top-Down,* que parte de la problemática identificada: integrar la generación de energía solar fotovoltaica con la agricultura, con el objetivo de aumentar la eficiencia del uso del suelo al producir energía eléctrica y alimentos en una misma área de tierra, promoviendo así una sostenibilidad agrícola y energética. A partir de esta problemática, se abordan detalles específicos para la planificación de sistemas AgroPV en territorios agrícolas de Colombia, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales.

Inicialmente, se lleva a cabo un levantamiento y análisis de datos secundarios. Esta información abarca los fundamentos de la tecnología agrivoltaica, las metodologías aplicadas para su desarrollo y los casos de estudio implementados. Una vez consolidada, se realizan deducciones que permiten categorizar los cultivos aptos para el desarrollo de la tecnología, así como identificar las zonas potenciales para su implementación, los requisitos técnicos y los parámetros económicos.

A partir de la información recopilada, se estructura un conjunto de etapas para la planificación de sistemas AgroPV en zonas agrícolas de Colombia, tal como se presenta en la Figura 2.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

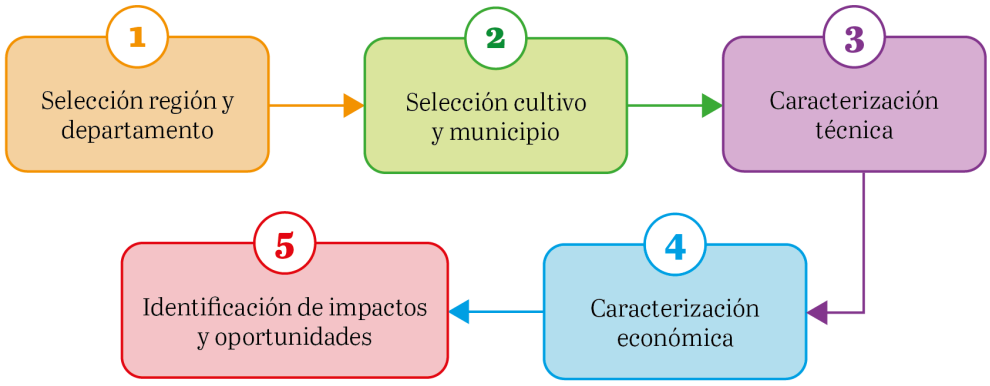


Figura 2. Etapas de diseño y planificación de sistemas AgroPV. *Fuente:* Elaboración propia

Selección de la región y departamento de estudio: a partir de la revisión del estado del arte, se determina inicialmente la región del país más adecuada para el desarrollo de la tecnología AgroPV. Para esto, se considera la irradiación solar disponible como criterio de selección. Una vez determinada la región, se recolecta información sobre el sector agrícola, la cual es analizada para identificar el departamento con mayor producción y área cosechada.

Selección de municipio y cultivo a estudiar: una vez identificado el departamento, se emplean bases de datos nacionales para identificar el cultivo mayoritariamente cosechado que, a su vez, es apto para la implementación de la tecnología según la revisión del estado del arte. Acto seguido, se aplica el método de decisión multicriterio *VIKOR* para seleccionar el municipio o zona de estudio. Este método permite considerar múltiples criterios, tanto técnicos como socioeconómicos, tales como la irradiación solar disponible, la calidad en la prestación del servicio eléctrico y la producción del cultivo, entre otros.

Caracterización técnica: para el diseño del sistema AgroPV, inicialmente se levanta información sobre sus requerimientos energéticos, lo que permite construir el perfil de demanda. Una vez construido este, a partir de las deducciones y análisis de la información secundaria consolidada, se infieren las restricciones y requerimientos de la estructura. Posteriormente, se diseña el sistema AgroPV, identificando aspectos como la producción de energía eléctrica, la capacidad instalada, el rendimiento energético y la potencia exportada e importada a la red local, entre otros.

Caracterización económica: en esta etapa, en primer lugar, se construyen los costos asociados a la inversión, operación y mantenimiento del sistema. En segunda instancia, se realiza el análisis financiero del sistema al identificar su utilidad. Finalmente, una vez analizados los resultados obtenidos, se proponen diversos modelos de negocio para evaluar la sostenibilidad del sistema diseñado.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Impactos y oportunidades de los sistemas AgroPV: una vez analizados los resultados obtenidos (caracterización técnica y económica), se aplican procesos inductivos para validar el potencial de la tecnología en la zona de estudio y determinar los posibles impactos ambientales, económicos y sociales. Asimismo, se proponen distintas oportunidades, barreras y limitaciones de la tecnología en el contexto colombiano, y se comparan los resultados obtenidos con los presentes en la literatura.

Selección de la región y departamento de estudio

A partir de la revisión del estado del arte, se identifica que los sistemas AgroPV presentan un mayor potencial en áreas con alta irradiación solar, como las zonas áridas y semiáridas, y, por consiguiente, se utiliza como criterio principal para la selección de la región. Con respecto a la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones, La Guajira y la Costa Atlántica presentan los valores más altos, con 2,19 y 1,83 kWh/m^2/año, respectivamente. De igual manera, en la Región Caribe se concentran los departamentos con los mayores valores de radiación solar global, superiores a los 5,5 kWh/m^2 por día. A partir de estos datos, el análisis se realiza en el caribe colombiano, ya que presenta una alta disponibilidad del recurso solar, lo cual es primordial para la implementación de paneles fotovoltaicos.

Dado que la irradiación solar global es alta en todos los departamentos de la Región Caribe (Atlántico, Cesar, Córdoba, Bolívar, La Guajira, Magdalena, Sucre, San Andrés, Providencia y Santa Catalina), la elección del departamento se basa en un estudio del sector agrícola de la región. Partiendo de los cultivos que podrían incrementar su productividad con la inclusión de paneles solares (Figura 1) y que son mayoritariamente cosechados en esta región, se consideran los cultivos de maíz tradicional, arroz de riego y yuca. Como se observa en la Figura 3, Bolívar lidera en producción y área cosechada de estos cultivos, por lo que se selecciona este departamento para el estudio.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

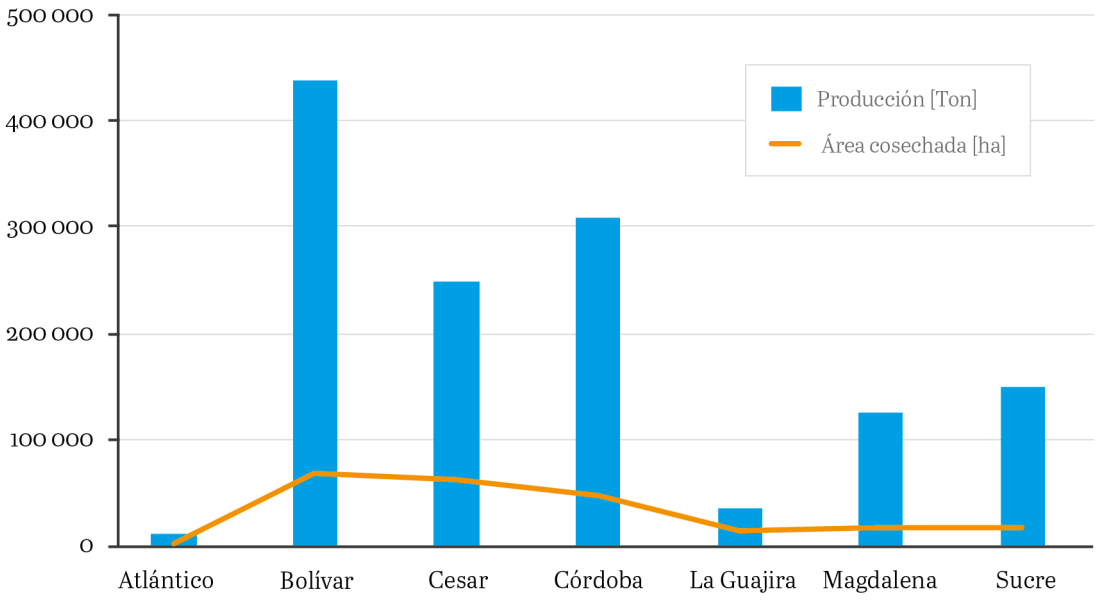


Figura 3. Área cosechada y producción de maíz, yuca y arroz por departamento de la Región Caribe (EVA) 2020.

Selección del municipio y cultivo a estudiar

Selección del cultivo

Dado que en el departamento de Bolívar la yuca es el cultivo con mayor producción y área cosechada (OECD, 2019) se selecciona esta raíz para el análisis. Aunque no se ha comprobado experimentalmente que la sombra de los paneles solares afecte la productividad de la yuca, algunos estudios han indagado los posibles efectos de la sombra en la morfología de la planta. Johnston y Onwueme (1998) identificaron que la yuca se adapta a la sombra incrementando el área de sus hojas.

Asimismo, Paul y Wilson (1986) concluyeron que la altura de la planta aumenta con mayor sombreado. Williams y Ghazali (1969) reportaron que la sombra incrementa el área foliar de la yuca. En India, Silalahi *et al*. (2021) encontraron que la yuca (mandioca) crece bien bajo distintas intensidades de sombra, y es recomendable en situaciones de baja luz (25% de sombra). Adicionalmente, Sekiyama y Nagashima (2019) determinaron que la yuca es un cultivo con alto potencial para la implementación de la tecnología AgroPV.

La yuca, cultivada principalmente en condiciones tropicales, requiere climas cálidos para un crecimiento óptimo, con plantas de hasta tres metros y con una densidad de siembra de 10 000 a 16 625 plantas por hectárea. Aunque es un cultivo importante para el país y ha sido considerada ecoeficiente, la escasa transferencia tecnológica en su

https://doi.org/10.53010/nys10.02

producción ha sido un desafío significativo, así como la baja tecnificación del cultivo, lo que resalta la necesidad de asistencia técnica y mecanización (Canales y Trujillo, 2021).

Selección del municipio

De los 21 municipios de Bolívar que durante el segundo semestre del 2020 produjeron y cosecharon yuca, se identifican los siete con mayor área cosechada: Villanueva, Calamar, San Juan Nepomuceno, Mahates, Turbana, Cantagallo y María la Baja. Una vez identificados, se determinan siete criterios de decisión, a partir de los cuales se realiza la selección del municipio de estudio, por medio del método de decisión multicriterio discreto *VIKOR* (Muñoz y Romana, 2016).

Los criterios de decisión son:

- Área cosechada (hectáreas) de yuca durante el segundo semestre del 2020 en el municipio.
- Producción en toneladas de yuca en cada municipio durante el segundo semestre del 2020.
- Rendimiento del cultivo durante el segundo semestre del 2020 (t/ha) en cada municipio.
- Duración promedio en horas de las interrupciones percibidas por un usuario conectado al Sistema Interconectado Nacional (Servicios Públicos Domiciliarios, 2019). Este indicador es conocido como SAIDI, por sus iniciales en inglés.
- Frecuencia media de interrupción del servicio de electricidad por usuario conectado al Sistema Interconectado Nacional, medida en veces (Servicios Públicos Domiciliarios, 2019). Este indicador es conocido como SAIFI, por sus iniciales en inglés.
- Irradiación global horizontal promedio anual (*Global Horizontal Irradiation*) que llega a cada municipio medida en kilovatio hora por metro cuadrado (GHI)[1].
- Salida de potencia fotovoltaica específica en el municipio por año, medida en kWh/kWp (PV OUT).

Para la evaluación multicriterio, se dispone de siete criterios de decisión y se han identificado previamente siete municipios, como se muestra en la Figura 4.

1 Datos extraídos del Atlas Solar Global. Año 2022.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

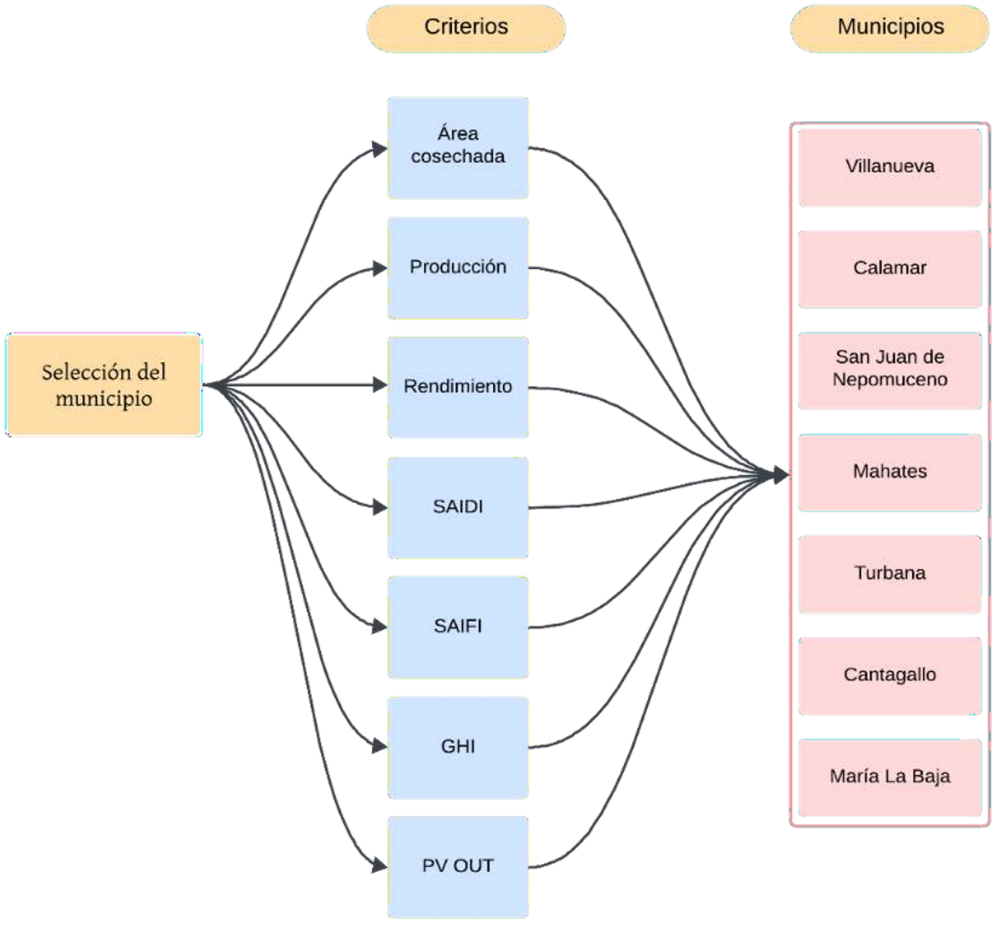


Figura 4. Esquema criterios de decisión (parámetros) y municipios (alternativas). *Fuente:* elaboración propia.

En la Tabla 1 se detallan los valores correspondientes a cada municipio para cada uno de los criterios de decisión.

Municipio	Área Cosechada [ha]	Prod. [ton]	Ren. [ton/ha]	SAIDI [Horas]	SAIFI [Veces]	GHI [kWh/ m²]	PVOUT [kWh/ kWp]
Villanueva	600	17 424	29	261,8	205,8	5,31	4,25
Calamar	580	11 914	20,5	137,5	109,6	5,45	4,32
San Juan Nepomuceno	1 500	18 000	12	138,8	127,2	5,27	4,2
Mahates	885	8 850	10	240,2	212,1	5,35	4,25
Turbana	660	5 280	8	267,2	269,6	5,43	4,35
Cantagallo	642	5 136	8	65,1	68,4	5,32	4,22
María la Baja	600	4 800	8	230,4	225,1	5,33	4,26

Tabla 1. Valores criterios de decisión por municipio. *Fuente:* elaboración propia.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

El método *VIKOR* se compone de los siguientes pasos (Muñoz y Romana, 2016):

Cálculo de los mejores, f_i^*, y los peores, f_i^-, valores de cada criterio:

$$f_i^* = max_i f_{ij} \qquad f_i^- = min_i f_{ij} \qquad \textit{si la función i representa un beneficio}$$
$$f_i^* = min_i f_{ij} \qquad f_j^- = max_j f_{ij} \qquad \textit{si la función i representa un coste}$$

Cálculo de los valores S_j, R_j, Q_j para cada alternativa:

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}$$

$$R_j = \max i \left[w_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right]$$

$$Q_j = v \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1\text{-}v) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*}$$

Donde:

$S^* = min_j S_j, S^- = max_j S_j, R^* = min_j R_j, R^- = max_j R_j, w_i$ es el peso o ponderación del criterio, i y v es introducido como un peso de la estrategia de máxima utilidad de grupo, mientras que $(1 - v)$ es el peso de la oposición individual. En el presente documento, se toma el valor de $v = 0.5$, que corresponde a una situación de "consenso".

Organización de las alternativas: se ordenan las alternativas de forma decreciente a partir de los valores de S, Q y R calculados. Los resultados se componen de tres listas en total.

Obtención de la solución compromiso: una vez ordenadas las alternativas, se selecciona la alternativa $A^{(1)}$ como la solución de compromiso, puesto que presenta el valor mínimo de Q, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

Condición 1: ventaja aceptable.

$$Q\,(A^{(2)}) - Q\,(A^{(1)}) \geq DQ$$

Donde, $A^{(2)}$ es la segunda alternativa según la clasificación de los valores de Q y $DQ = \frac{1}{j-1}$, siendo j el número de alternativas (siete municipios).

Condición 2: se debe garantizar una estabilidad aceptable en el proceso de decisión, por lo cual, la alternativa $A^{(1)}$ debe ser también la mejor clasificada según los valores de S y/o R.

Para calcular el peso de cada criterio, se utiliza el método del autovector. En este método, los pesos corresponden a las componentes del autovector asociado al autovalor

https://doi.org/10.53010/nys10.02

dominante de una matriz de comparaciones pareadas entre los criterios. Estas comparaciones se realizan utilizando una escala que mide la importancia relativa entre los criterios: igual, moderada, fuerte, muy fuerte y extrema, como se presenta en la Tabla 2. En la Tabla 3 se observa la matriz construída de las comparaciones pareadas entre los criterios.

Igual	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
1	3	5	7	9

Tabla 2. Valores de importancia relativa entre los criterios. *Fuente:* elaboración propia.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
C_1	1	1	1/5	2	2	1/5	1/5
C_2	1	1	1/5	2	2	1/5	1/5
C_3	5	5	1	7	7	1	1
C_4	1/2	1/2	1/7	1	1	1/7	1/7
C_5	1/2	1/2	1/7	1	1	1/7	1/7
C_6	5	5	1	7	7	1	1
C_7	5	5	1	7	7	1	1

Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas entre criterios. *Fuente:* elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla 4 se presentan los pesos obtenidos para cada criterio:

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	W
C_1	0,056	0,056	0,054	0,074	0,074	0,054	0,054	**0,060**
C_2	0,056	0,056	0,054	0,074	0,074	0,054	0,054	**0,060**
C_3	0,278	0,278	0,271	0,259	0,259	0,271	0,271	**0,270**
C_4	0,028	0,028	0,039	0,037	0,037	0,039	0,039	**0,035**
C_5	0,028	0,028	0,039	0,037	0,037	0,039	0,039	**0,035**
C_6	0,278	0,278	0,271	0,259	0,259	0,271	0,271	**0,270**
C_7	0,278	0,278	0,271	0,259	0,259	0,271	0,271	**0,270**

Tabla 4. Pesos asociados a cada criterio. *Fuente:* elaboración propia.

Una vez calculados los pesos, se da inicio al método de *VIKOR* descrito y se obtiene como solución óptima el municipio de Calamar, que cumple con las condiciones de ventaja y estabilidad aceptables en el proceso de decisión. Por consiguiente, se da por finalizado el método con Calamar como municipio seleccionado, luego con Villanueva y en tercer lugar con Turbaná.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Descripción del municipio seleccionado

El municipio de Calamar presenta una extensión total de 246 km², de los cuales el 99,3% corresponden al área rural, dividida en cuatro corregimientos: Hato Viejo, Barranca Nueva, Barranca Vieja y El Yucal, que concentran el 44% de los habitantes del municipio (MADR, 2020). En el sector agrícola, la yuca destaca como la cadena productiva más importante en términos de ingresos, con un 62%, y contribuye al empleo con un 25,6%. El corregimiento El Yucal representa el 29% del área sembrada del municipio y muestra un alto potencial para la generación fotovoltaica, con un promedio de 5,70 kWh/m²/día de GHI[2], como se observa en la Figura 5.

Con respecto a la prestación del servicio eléctrico, el área rural del municipio cuenta con una cobertura del 93,8%. Sin embargo, los indicadores de calidad del servicio, como SAIDI y SAIFI, muestran valores considerablemente altos en comparación con el promedio nacional, en este caso 6,4 y 5,8 veces mayor, respectivamente. Lo anterior indica una carencia significativa en términos de calidad del servicio eléctrico en el municipio. Además, es importante destacar que los habitantes rurales pagan mensualmente tarifas hasta un 72% mayores en comparación con los habitantes de otros municipios de este departamento[33].

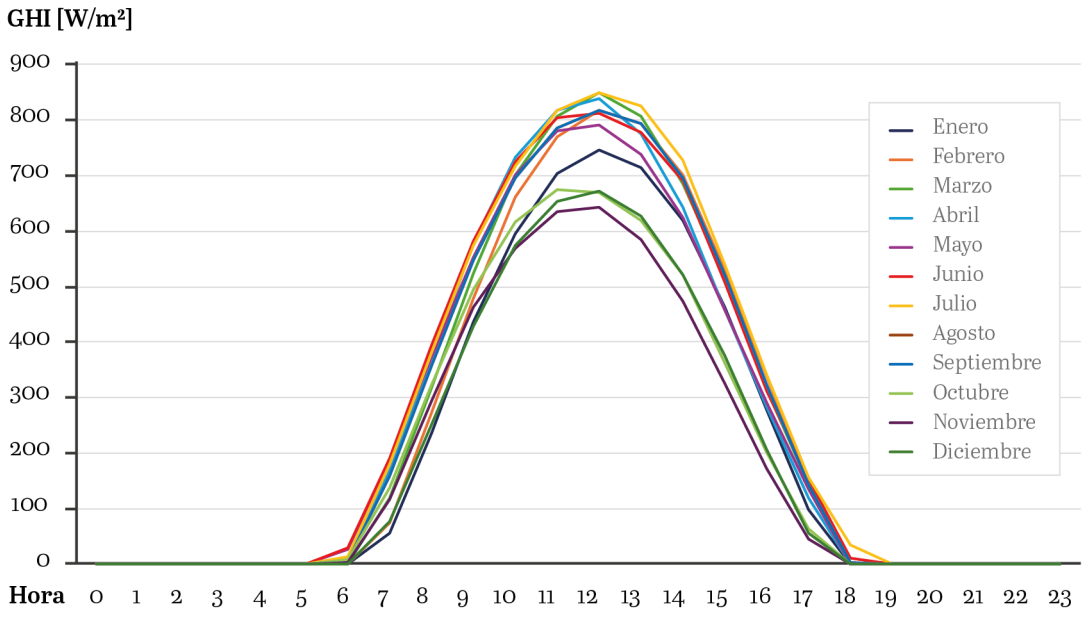


Figura 5. Irradiación media global diaria El Yucal, Calamar. *Fuente:* elaboración propia.

2 Datos disponibles en la plataforma de la Comisión Europea Photovoltaic Geographical Information System (PVG).

3 Información disponible en el Sistema Único de Información (SUI), 2020.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Caracterización técnica

Requerimiento energético

El perfil de carga mensual de un usuario residencial en la zona rural se obtiene del Sistema Único de Información (SUI) y se modela utilizando el software *System Advisor Model* (SAM) para obtener el perfil de carga diario promedio de cada mes. Además del consumo residencial, se considera el requerimiento de irrigación diaria para el cultivo de yuca, estimado en 38.33 litros para zonas calurosas y un área de 283 m² (Gheewalam *et al.,* 2014). Para esto, se selecciona una electrobomba de 375 W con un caudal máximo de 30 l/min y se estima su uso durante tres horas diarias (12:00, 13:00 y 14:00) durante los meses de siembra de la yuca: febrero a noviembre, con la cosecha en diciembre.

El perfil de carga diario del agricultor incluye estos requisitos adicionales de energía, como se muestra en la Figura 6, destacando los picos de consumo a las 12:00, 13:00 y 14:00 (0,550 kW, 0,548 kW y 0,544 kW, respectivamente) cuando opera la electrobomba dimensionada. En promedio, el consumo mensual de energía eléctrica es de 164,2 kWh, siendo noviembre el mes de mayor demanda con 193,1 kWh/mes.

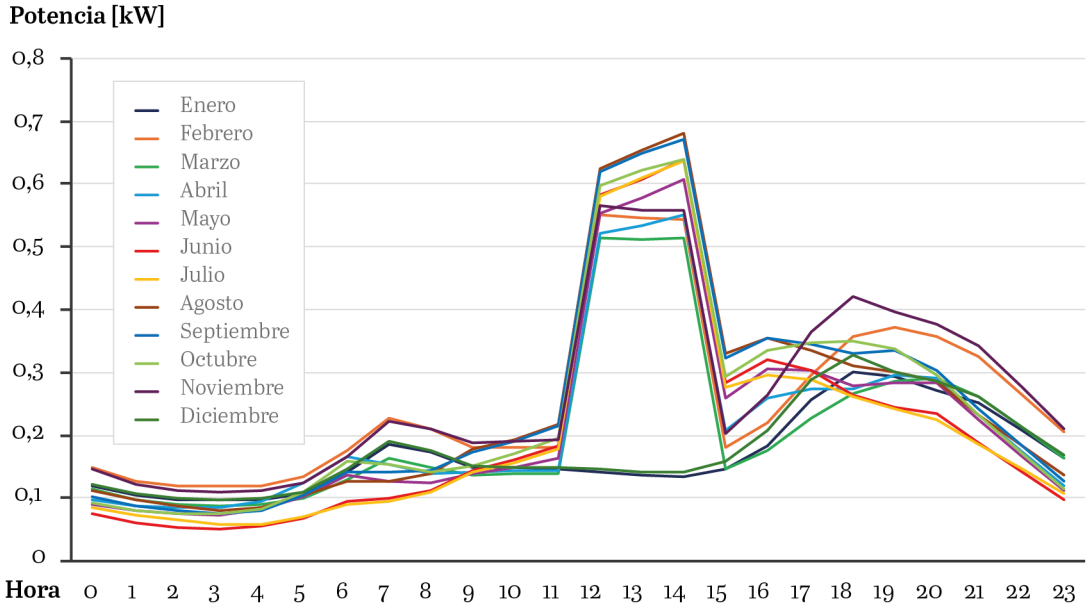


Figura 6. Demanda promedio diaria a lo largo del año del agricultor. *Fuente:* elaboración propia.

Diseño del sistema AgroPV

El área de estudio abarca 283 m², donde los módulos fotovoltaicos están montados en una estructura metálica a cuatro metros sobre el suelo, dispuestos en cuatro columnas separadas por 3,5 metros, como se muestra en la Figura 7. Este sistema fotovoltaico

https://doi.org/10.53010/nys10.02

tiene una capacidad instalada de 14,4 kW, compuesto por 40 paneles AE Solar bifaciales de 360 W cada uno, con doble vidrio monocristalino y una inclinación de 13° y ángulo azimut de 180° para maximizar el potencial fotovoltaico diurno. La densidad del sistema es de 501,56 kW por hectárea, orientados de este a oeste para asegurar una iluminación uniforme sobre el cultivo. La altura de la estructura, el espaciamiento de los paneles y la densidad del sistema son elementos cruciales en el diseño de sistemas AgroPV (Cho *et al.*, 2020; Zainol *et al.*, 2021). La altura adecuada de los paneles, a cuatro metros, minimiza la sombra sobre los cultivos (30%) y considera que la planta de yuca puede crecer entre 1,5 y 2,5 metros de altura. Además, con una distancia entre filas de 3,5 metros, los paneles bifaciales aprovechan eficientemente la luz ambiental en el reverso para generar más energía, ofreciendo además mayor transparencia que los paneles monofaciales, lo que los hace especialmente adecuados para sistemas AgroPV. En total, el área utilizada es de 0,02871 hectáreas.

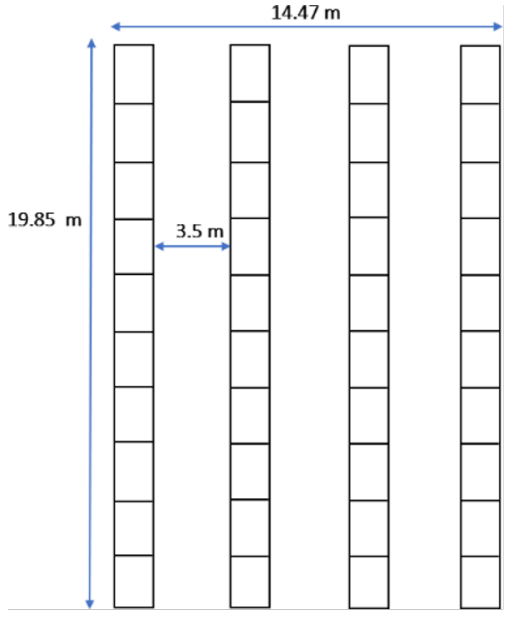


Figura 7. Distribución paneles solares en el sistema AgroPV. *Fuente:* elaboración propia.

Producción de energía eléctrica y características técnicas del sistema

Considerando aspectos climáticos, el perfil de demanda previamente determinado y la estructura AgroPV propuesta, se obtiene la energía producida en cada mes del año durante todo el día. El factor de capacidad de la planta solar y el rendimiento energético anual se resumen en la Tabla 5.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Aspecto	Valor
Capacidad Instalada	14,4 kW
Densidad del Sistema Solar	501,56 kW/ha
Energía Producida Anualmente	24,389 kWh
Factor de Capacidad	18,50%
Rendimiento Energético	1 693 kWh/kW

Tabla 5. Características técnicas del sistema solar fotovoltaico. *Fuente:* elaboración propia.

La Figura 8 muestra la potencia diaria generada por el sistema fotovoltaico entre las 6:00 y las 17:00 horas durante diferentes meses del año, considerando un día sin nubosidad. El valor máximo de generación alcanza los 9,24 kW.

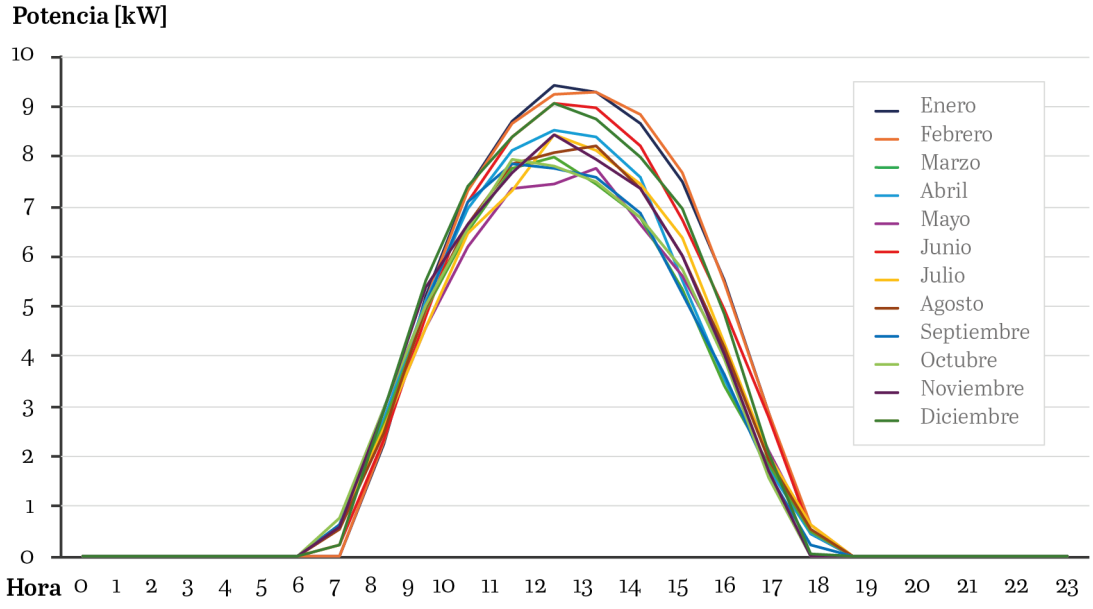


Figura 8. Potencia generada por el sistema solar fotovoltaico. *Fuente:* elaboración propia.

Dado que el sistema no cuenta con almacenamiento, el agricultor requiere consumir energía de la red eléctrica local en las 12 horas donde los paneles no producen electricidad, como se presenta en la Figura 9. El mayor importe de potencia ocurre a las 18 horas, cuyo valor es de 0,42 kW.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

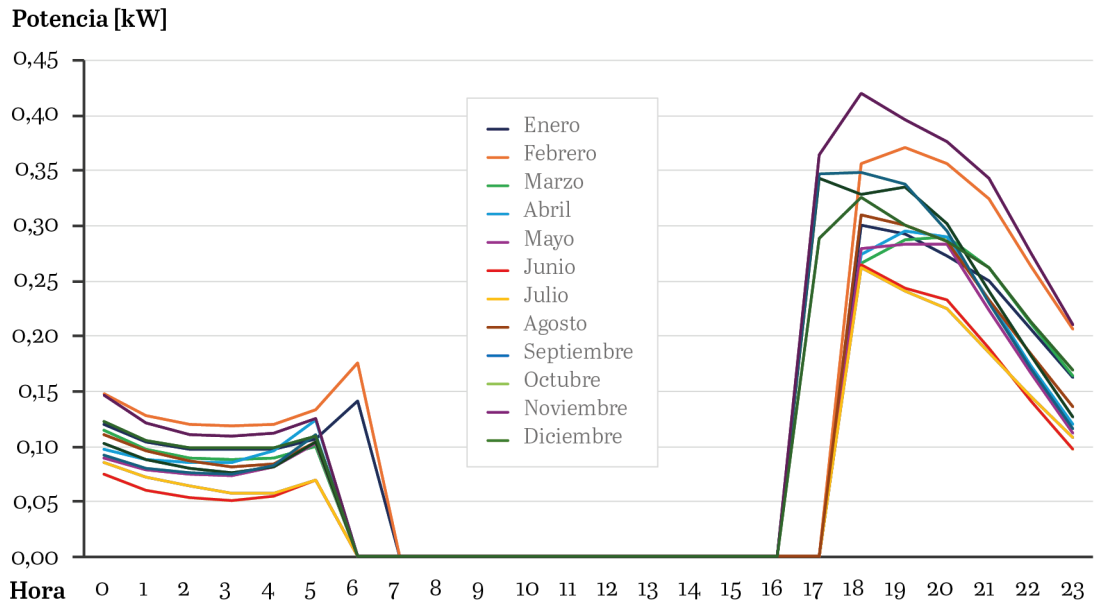


Figura 9. Potencia importada de la red eléctrica por parte del agricultor. *Fuente:* elaboración propia.

Debido a que el agricultor no requiere de toda la energía generada por los paneles (la demanda eléctrica es considerablemente baja), puede exportar diariamente el excedente de energía a la red local durante las horas en las que hay diferencia entre la oferta y la demanda, como se observa en la Figura 10. Esta capacidad de exportación será analizada a continuación en la caracterización económica del sistema.

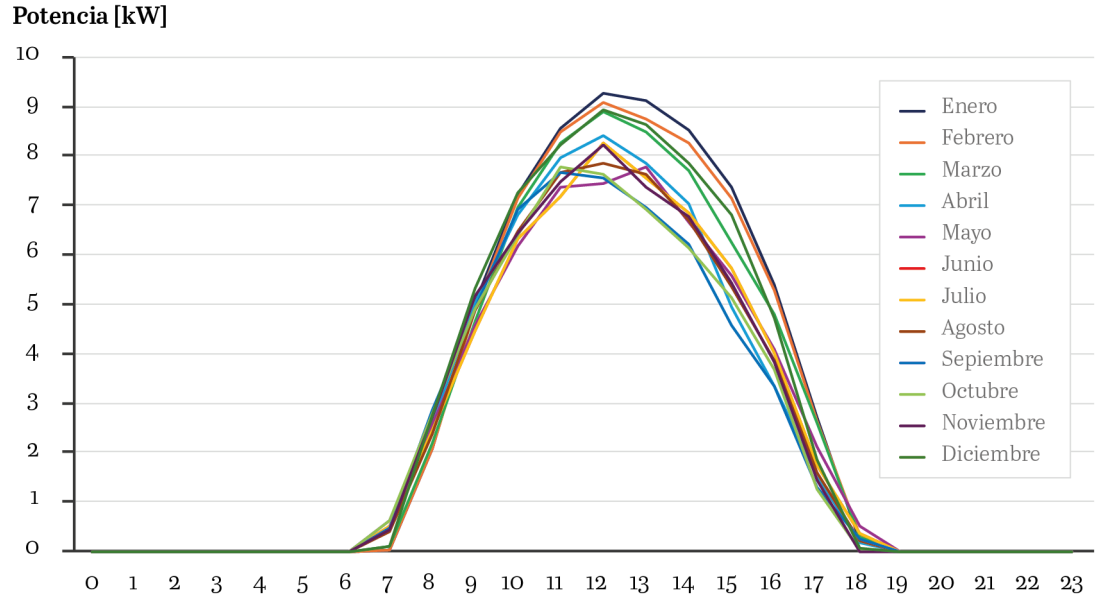


Figura 10. Potencia exportada a la red eléctrica local. *Fuente:* elaboración propia.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Finalmente, se calcula la energía mensual producida por el sistema, así como la cantidad de electricidad que se requiere importar y el excedente que se exporta a la red eléctrica local, como se muestra en la Figura 11. Aquí se evidencia que la mayor parte de la generación se exporta a la red eléctrica y la cantidad de energía importada es considerablemente baja. Enero es el mes de mayor generación (2 316,7 kWh/mes) y menor demanda (125,4 kWh/mes); por consiguiente, corresponde al mes con mayor venta de excedentes, con valores de 2 028,8 kWh/mes.

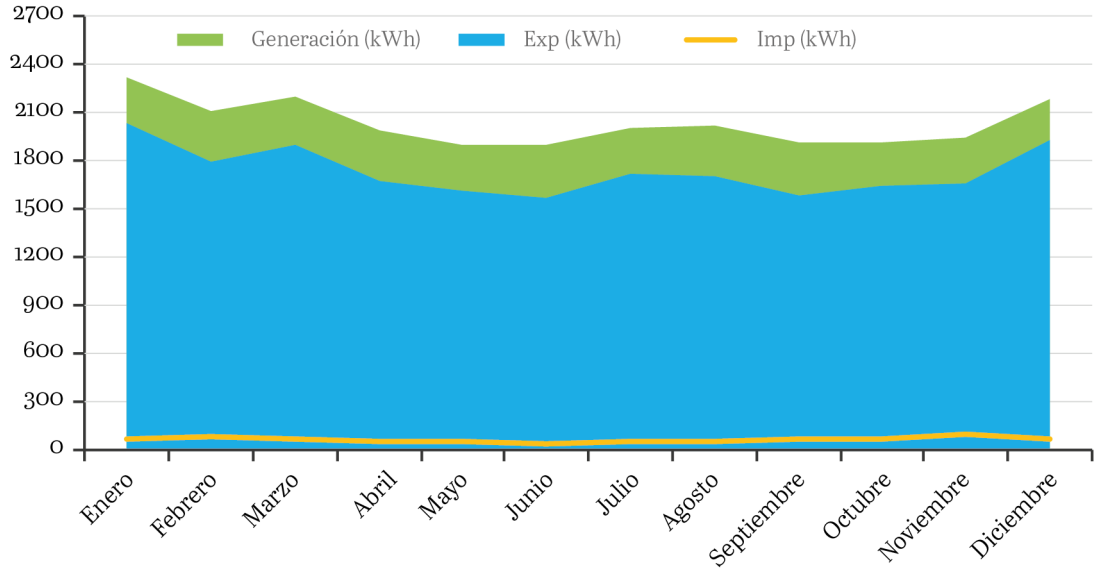


Figura 11. Energía producida, importada y exportada mensualmente a la red eléctrica.
Fuente: elaboración propia.

Caracterización económica

Costos asociados a la inversión

Los sistemas AgroPV, de acuerdo con las experiencias internacionales, presentan una inversión mayor en comparación con sistemas fotovoltaicos convencionales, debido al costo asociado a la estructura requerida y su instalación, la preparación requerida por el terreno y, en general, toda la mano de obra necesaria. De acuerdo con las experiencias internacionales, para el sistema diseñado se establece un incremento del 30% en el valor de la inversión. Como se evidencia en la Tabla 6, la inversión total es de 68 millones de pesos, de los cuales, las obras civiles y los paneles son los que mayor relevancia presentan.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Ítem	Cantidad	Costo unitario (COP)	Total (COP)	Total (USD)[4]
Panel solar bifacial 360Wp[5]	40	678 000	27 120 000	6 692,3
Inversor SMA-Sunny Boy 6.0 US[6]	2	5 178 051	10 356 102	2 555,8
Medidor bidireccional trifásico[7]	1	720 000	720 000	177,7
Costo total equipos			**38 196 102**	**9 426,48**
Obras civiles y estructura			14 132 558	3 487,8
Inversión			52 328 660	12 914,2
Inversión total sistema Agro PV (+30%)			**68 027 258**	**16 788,5**

Tabla 6. Inversión sistema AgroPV. *Fuente:* elaboración propia.

Costos asociados a la operación y mantenimiento

Para el sistema diseñado, se establece como costo de operación y mantenimiento el equivalente al 5% de la inversión total. Este mantenimiento comprende la limpieza de los paneles solares e inversores a lo largo de la vida útil del sistema (25 años). Sin embargo, debido a la altura de la estructura y distanciamiento entre los paneles, el mantenimiento puede ser más complejo, incrementando los costos en un 10%. A partir de esto, se obtiene un costo anual de 149 660 pesos.

Utilidad del cultivo y venta de excedentes a la red eléctrica local

Para calcular el precio de producción por hectárea sembrada de yuca, se consideran costos como la semilla, el transporte, las adecuaciones del terreno, fertilizantes, entre otros (MADR, 2019). Se obtuvo, para las 0,02871 hectáreas sembradas, un costo de producción de 169 323 pesos. Tras calcular los costos y el precio pagado al productor por cada kilogramo de yuca criolla[8] se determina una utilidad de la cosecha de 589 kg, equivalente a 429 631 pesos.

4 1 dólar equivale a 4 052 pesos colombianos (9 julio 2024).

5 Información disponible en el Sistema Único de Información (SUI), 2020.

6 Información disponible en el Sistema Único de Información (SUI), 2020.

7 Equipo cotizado en INDELDEC (2022).

8 Datos extraídos de la herramienta interactiva https://cassavalighthouse.org/en/data/price#

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Por parte de la venta de excedentes de energía, en Colombia, debido a la Resolución CREG[9] 174 de 2021, que actualiza las reglas de autogeneración a pequeña escala y generación distribuida, es posible que pequeños autogeneradores que utilicen FNCER con una capacidad instalada menor a 1 MW obtengan remuneración por la entrega de excedentes a la red, mediante un esquema bidireccional como créditos de energía.

Una vez obtenida la energía a ser importada y exportada a la red mensualmente (ver Figura 11), se calcula el valor mensual que va a ser recibido por la inyección de los excedentes ($\$_{Exc}$). Para su cálculo, se utiliza la siguiente ecuación, que incluye el componente de comercialización de la comercializadora de Calamar (*CV*) (Servicios Públicos Domiciliarios, 2020), el costo unitario de la prestación del servicio[10] (*CU*) y el precio en bolsa[11] (P_{bolsa}) de la energía en el mercado nacional:

$$\$_{Exc} = (Excedente - importada) * CU - [(Excedente - importada) * CV] + Exc * P_{bolsa}$$

En la Figura 12 se observa el ingreso mensual por la inyección de excedentes de energía, con un ingreso anual de 3 847 070 pesos.

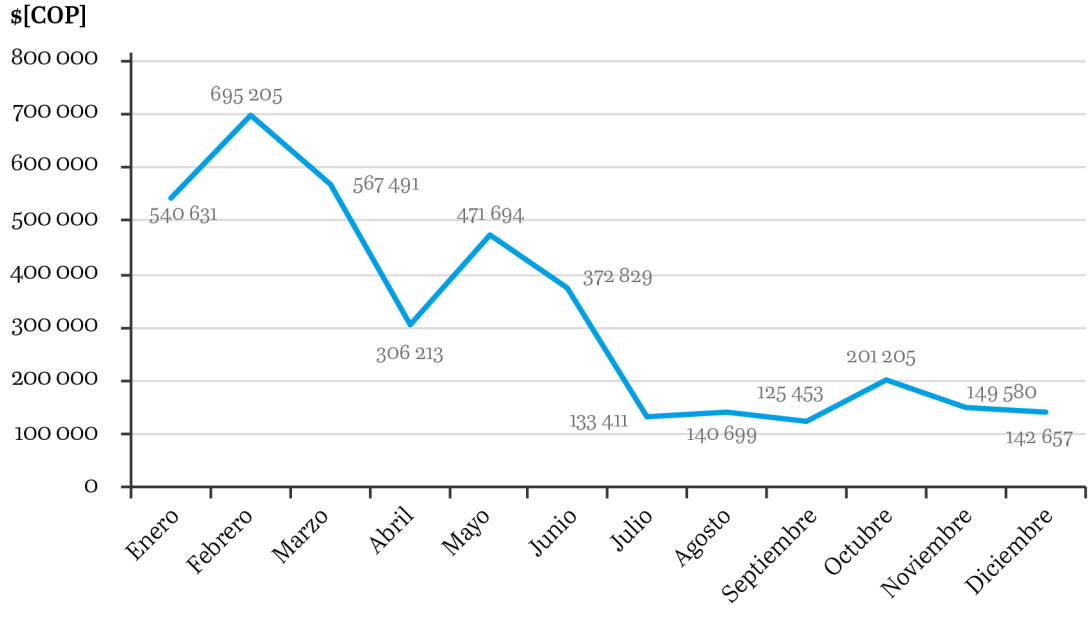


Figura 12. Ingresos mensuales debido a la venta de excedentes de energía. *Fuente:* elaboración propia

9 Comisión de Regulación de Energía y Gas.

10 Tarifa mensual usuarios residenciales rurales Calamar año 2020, tomado de SUI.

11 El precio de bolsa mensual de energía para el año 2020 es tomado de XM.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Propuesta de modelos de negocio

Para los tres distintos modelos de negocio del sistema AgroPV diseñado, se identifican tres actores clave: el agricultor, el sector público y un inversionista privado; como se representa en la figura 13. El agricultor posee el terreno y se encarga del cultivo de yuca, desde la siembra hasta la cosecha, asumiendo los costos y recibiendo los ingresos correspondientes. Además, con el fin de otorgarle beneficios, utiliza la energía generada por el sistema durante el día, lo que le permite ahorrar significativamente en comparación con el uso exclusivo de la red eléctrica local, reduciendo sus costos mensuales en un 58,5% en promedio durante el año de estudio.



Figura 13. Agentes involucrados en los modelos de negocio propuestos. *Fuente:* elaboración propia.

Modelo autónomo

El agricultor es el propietario del sistema AgroPV, realiza la inversión y operación del sistema, y asume todos los gastos de mantenimiento. Además, como fuente de ingresos, vende los excedentes de producción de energía al operador local, y recibe un ingreso mensual durante la vida útil del proyecto. Para la financiación del sistema, si el agricultor no cuenta con los recursos requeridos inicialmente, puede acudir a créditos y fondos disponibles que apoyen este tipo de iniciativas.

Modelo híbrido

Un agente privado invierte en el sistema agrofotovoltaico, cubriendo la inversión inicial del proyecto y el reemplazo de los inversores en el año 15 de vida útil del sistema. Este agente recibe mensualmente el dinero correspondiente a la venta de excedentes durante la vida útil del sistema AgroPV. Por otra parte, la operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico es realizada por el agricultor, quien tiene dos opciones debido a la sencillez del mantenimiento del sistema:

https://doi.org/10.53010/nys10.02

- Contratar a un agente externo para realizar la operación y mantenimiento del sistema, que tiene un costo estimado anual de 149 660 pesos.
- Realizar las actividades de mantenimiento del sistema, las cuales consisten en limpiar cada cierto tiempo (4 veces al año en promedio) los paneles solares e inversores (dos veces al año) y así, no solo ahorrar recursos económicos, sino aprender sobre la tecnología solar y su adecuada operación y cuidados.

Modelo comunitario

Este modelo social utiliza el sistema AgroPV para proporcionar energía eléctrica a los residentes del municipio (sin venta de excedentes a la red). Un agente público, financiado por el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), construye el sistema fotovoltaico en un cultivo de yuca de un agricultor local. Este sistema suministra energía al agricultor y a 20 familias durante las horas de generación diurna, mejorando la calidad del servicio eléctrico y reduciendo los costos mensuales en aproximadamente 56% para las familias.

La Figura 14 resume los modelos de negocio propuestos, diferenciados por las actividades o papel que cumple cada agente involucrado desde el inicio del proyecto energético.

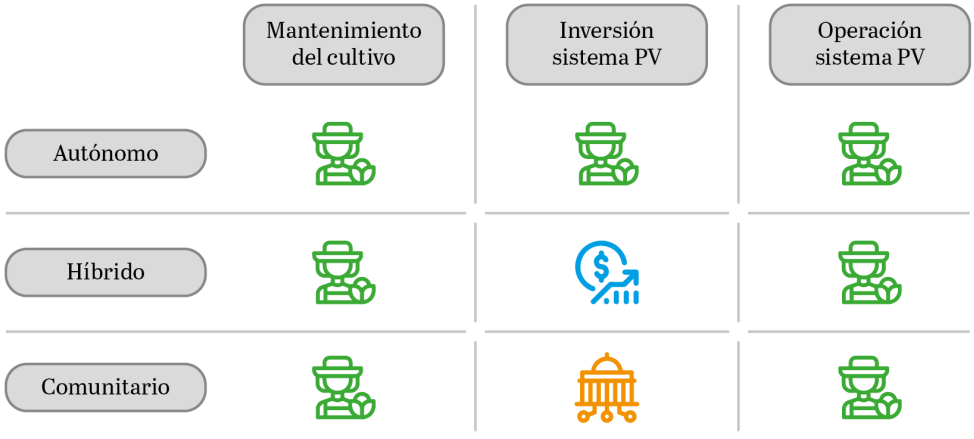


Figura 14. Resumen modelos de negocio. *Fuente:* elaboración propia

Al analizar los distintos modelos de negocio propuestos, el modelo menos factible es aquel donde el agricultor asume los costos de inversión y operación del sistema fotovoltaico. Esto se debe a la situación socioeconómica del agricultor, que probablemente no cuente con los recursos suficientes para realizar la inversión inicial. Además, aunque existen fondos y medios de financiación, el acceso al crédito para pequeños productores es limitado, dificultando la obtención del dinero inicial requerido. En contraste, el modelo híbrido, en el cual un agente privado asume la inversión y el reemplazo de equipos, ofrece un escenario más viable. En este caso, el inversionista puede obtener

https://doi.org/10.53010/nys10.02

beneficios económicos, sociales y ambientales, mientras que el agricultor reduce sus gastos, adquiere conocimientos sobre generación fotovoltaica, reduce los efectos de la alta irradiación en su cultivo y disminuye la demanda de agua para irrigación de la yuca.

Por otro lado, el modelo comunitario demuestra que la tecnología AgroPV no solo mejora la eficiencia en el uso del suelo, sino que también puede suministrar energía limpia a múltiples familias, convirtiéndose en una alternativa sostenible para mejorar la electrificación rural y reducir las tarifas mensuales de las familias. En conclusión, el sistema AgroPV diseñado puede ser financiado de diversas maneras factibles. La selección del modelo de negocio depende de factores como los recursos económicos del agricultor, la disponibilidad de fondos y créditos, la promoción de la inversión privada y la destinación de fondos públicos para la implementación y difusión de la tecnología AgroPV en áreas rurales y agrícolas como en el municipio de Calamar.

Impactos y oportunidades sistemas AgroPV

Posibles impactos ambientales, económicos y sociales

- El sistema diseñado optimiza el uso del suelo al combinar la agricultura y generación de energía, reduce el consumo de agua en el riego de cultivos, disminuye la demanda de electricidad y las emisiones de CO_2 al utilizar FNCER.
- Para los agricultores, el sistema propuesto es una alternativa para aumentar sus ingresos a partir de la venta de excedentes de energía y contribuye a una agricultura más resiliente ante pérdidas de cosechas. Además, al consumir electricidad directamente del sistema fotovoltaico en lugar de la red eléctrica local, los agricultores pueden ahorrar considerablemente.
- La calidad del servicio eléctrico en el municipio es deficiente, por lo que la inclusión de paneles solares en los cultivos descentraliza la generación de electricidad, lo que permitiría mejorar las condiciones de calidad de suministro. Además, si se emplea un modelo comunitario, no solo se beneficiaría el agricultor, sino también familias que ahorrarían dinero mensualmente y adquirirían conocimientos sobre FNCER, mientras se contribuye a la reducción de conflicto por el uso del suelo.

Oportunidades de los sistemas AgroPV

Alternativa como descentralización del SIN

Al implementar a escala sistemas AgroPV en la región de estudio, la calidad del servicio eléctrico en los centros agrícolas se vería mejorada, y daría la posibilidad a los

https://doi.org/10.53010/nys10.02

agricultores de no requerir energía eléctrica del sistema interconectado nacional (SIN) la mayor parte del día, para mejorar los niveles de estabilización en el servicio eléctrico rural. Con una reducción en la demanda eléctrica del SIN, se daría una menor necesidad de ampliación de las redes de transmisión y distribución.

Inclusión de sistemas de almacenamiento

Al considerar la implementación de baterías para almacenar energía, se lograrían sistemas 100% descentralizados e independientes. Para analizar esta oportunidad que ofrecen los sistemas AgroPV, se utiliza el software Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER), con el fin de identificar aspectos técnicos y económicos relevantes para dos diferentes escenarios, teniendo en cuenta el sistema AgroPV diseñado en la zona de estudio.

- Escenario 1: gracias a la inclusión de baterías, el agricultor no necesita comprar energía de la red local. Sin embargo, la energía excedente producida es inyectada a la red durante las horas del día en que la planta solar genera electricidad, por lo cual el sistema no está completamente aislado.
- Escenario 2: corresponde a un modelo comunitario, donde se suministra energía eléctrica tanto al agricultor como a viviendas en El Yucal, sin conexión a la red; es decir, es un sistema independiente y aislado. Como la capacidad instalada es fija, el número de viviendas que alimenta el sistema solar se reduce de 20 a 8. Esto se debe a que parte de la energía producida por los paneles debe ser almacenada en las baterías, lo que disminuye considerablemente la cantidad de electricidad disponible para ser suministrada directamente a las viviendas. Cabe resaltar que, dado que es un sistema aislado al SIN, no le aplica las resoluciones 030 de 2018 y la 174 de 2021.

En la Tabla 7 se resumen los principales aspectos para cada escenario, como el incremento en los costos de inversión y la cantidad de baterías requerida. La inclusión de un sistema de baterías para que el agricultor sea independiente de la red no incrementa significativamente la inversión (6,7%). Esto permite una reducción mensual en los gastos al evitar el pago de la tarifa del operador de la red, que es alta y variable, además de mejorar la calidad del servicio en la zona. Sin embargo, el reemplazo de las baterías cada seis años implica un gasto adicional de 2 558 600 pesos para el agricultor.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Aspecto	Escenario 1	Escenario 2
Consumidor /carga	Agricultor (8,91%)	Agricultor (13,1%)
(% de la energía generada)	Red (91,9%)	8 viviendas (86,9%)
Baterías de Plomo Ácido Gel 200 Ah, 12 V	2 unidades	72 unidades
Incremento en la inversión	6,7%	253%

Tabla 7. Principales resultados escenarios propuestos. *Fuente:* elaboración propia.

En el escenario 2, donde se suministra energía a más viviendas, la inversión inicial aumenta considerablemente, superando el 250%, lo que puede ser un obstáculo para proyectos de carácter social. Además, el reemplazo de las baterías, que representa el 68% de la inversión (92 millones de pesos), sería necesario cuatro veces durante la vida útil del sistema, y este costo probablemente tendría que ser asumido por las 8 viviendas y el agricultor. También se requiere un sistema de control centralizado para coordinar las cargas, los paneles y las baterías, lo que incrementa la inversión y los costos de operación y mantenimiento.

A pesar de estos desafíos, la implementación de proyectos energéticos 100% descentralizados, independientes y sostenibles mediante la tecnología AgroPV ofrece una solución viable para proporcionar energía eléctrica a las ZNI del país.

Propuesta de valor

La tecnología solar fotovoltaica ha demostrado que, durante su ciclo de vida, emite 40,5 veces menos gases de efecto invernadero que la tecnología térmica que utiliza diésel, lo que se traduce en una huella de carbono significativamente menor (Pan *et al*., 2024). La expansión de sistemas AgroPV podría posicionar los productos agrícolas como categoría premium, al ser cultivados con una huella de carbono reducida. Esto podría aumentar los ingresos de los agricultores al comercializar los productos a precios más altos que los cultivados convencionalmente.

Además, al proporcionar energía limpia a los centros agrícolas, se podría impulsar la tecnificación de cultivos como la yuca, mejorando la producción y rentabilidad al reducir los costos de electricidad o combustible, comúnmente generados por plantas de diésel. Esta energía también podría utilizarse para sistemas de riego, almacenamiento de agua y electrificación de maquinaria agrícola, fortaleciendo la seguridad alimentaria y la eficiencia del sector agrícola nacional.

https://doi.org/10.53010/nys10.02

Posibles barreras y limitaciones

Puede que la mayoría de los pequeños agricultores no cuenten con el capital requerido para invertir en soluciones fotovoltaicas, y el acceso a créditos es limitado (Canales y Trujillo, 2021). Asimismo, en el país se ha dado poco apoyo e incentivos a inversiones enfocadas en el desarrollo del sector agrícola.

A nivel nacional, la falta de información detallada es un desafío significativo. Se requiere invertir en estudios para recopilar datos precisos sobre irradiación solar, horas de brillo solar y otras variables en diversas ubicaciones, especialmente en zonas específicas como las ZNI. La promoción y masificación de la tecnología AgroPV en Colombia enfrenta obstáculos debido a la falta de proyectos piloto adaptados a las condiciones climáticas y económicas locales.

Resultados y discusión

En Colombia, la ganadería, la agricultura y el cambio de uso del suelo son las actividades que más generan emisiones (con el 59% del total para el año 2022), lo que hace crucial el desarrollo de instrumentos financieros que promuevan la inversión en tecnologías que permitan prácticas agrícolas eficientes en el uso del agua y del suelo, y que reduzcan los impactos ambientales de esta actividad. La tecnología AgroPV emerge como una solución viable para estos desafíos, especialmente en la descarbonización de la agricultura, el uso eficiente de recursos, la diversificación de ingresos y la resiliencia climática.

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2022-2026 destaca la necesidad de avanzar hacia la neutralidad de carbono y consolidar territorios resilientes al clima, priorizando el uso de recursos energéticos locales para acortar las brechas en términos de cobertura y calidad del servicio. Asimismo, el plan enfatiza en el fortalecimiento del sector productivo mediante la transición de la agricultura convencional a la agroecológica para aumentar la productividad del suelo, reducir la degradación ambiental y mejorar la resiliencia climática. Estos objetivos están estrechamente alineados con los sistemas AgroPV, una tecnología que no solo beneficia a los agricultores al proporcionarles ingresos adicionales, sino que también ayuda a mitigar el cambio climático.

Además, la tecnología puede actuar como una mediadora, integrando los sectores agrícola y energético para cumplir con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): hambre cero, energía asequible y no contaminante, industria, innovación e infraestructura, producción y consumo responsables, acción por el clima, y vida de ecosistemas terrestres.

Igualmente, la implementación masiva de estos sistemas es viable para cumplir con los compromisos del Acuerdo de París de 2015, reducir emisiones, fortalecer la seguridad

https://doi.org/10.53010/nys10.02

alimentaria, mejorar la eficiencia hídrica en la agricultura, promover prácticas agrícolas sostenibles, apoyar a los pequeños agricultores con innovación tecnológica (mayor diversificación de ingresos) y reducir la dependencia de la red eléctrica y de combustibles fósiles, generando un impacto no solo en el aspecto ambiental, sino también social y económico. Dada la alta irradiación solar en Colombia, el potencial de esta tecnología es significativo, especialmente en áreas agrícolas como Calamar.

En relación con el proceso de adopción de la tecnología por parte de los agricultores, Agir, Derin-Gure y Senturk (2023) analizan, mediante entrevistas, las percepciones tanto positivas como negativas sobre la implementación de sistemas AgroPV en Turquía. Los resultados muestran que el 93,7% de los entrevistados tiene una opinión favorable hacia la tecnología, destacando la oportunidad de vender electricidad a la red local, lo cual podría generar ingresos adicionales, considerando que la electricidad representa un costo significativo en sus actividades. Sin embargo, también se identifican preocupaciones relacionadas con el mantenimiento y limpieza de los paneles, el riesgo de robos y los altos costos de inversión.

Las entrevistas revelaron que los agricultores reconocen el potencial sinérgico de esta tecnología, incluso sin experiencia previa con sistemas AgroPV, y son conscientes de cómo estos sistemas podrían ayudar a resolver problemas locales, incluidos aquellos exacerbados por el cambio climático, más allá de las oportunidades económicas o financieras abstractas.

Con respecto a diferentes metodologías desarrolladas para el diseño de sistemas AgroPV, Katsikogiannis, Ziar e Isabella (2022) construyen una metodología compuesta por tres etapas: modelado geométrico, de irradiancia y de rendimiento. El objetivo principal es investigar el desempeño de los módulos PV, con un enfoque en los aspectos técnicos, sin considerar aspectos socioeconómicos y ambientales. Los resultados indican que la tecnología puede proporcionar sombra y protección contra condiciones climáticas adversas, posicionándose como componente clave para la transición energética.

Por otro lado, Willockx *et al.* (2024) analizan el diseño de un sistema AgroPV aplicado a huertos de peras. Los resultados indican que la viabilidad económica de la tecnología puede mejorar mediante la implementación de instalaciones a gran escala y la inclusión de subsidios, con el fin de minimizar el riesgo de inversión. Al igual que en el presente estudio, se concluye que se requieren modelos de negocio acoplados a las necesidades de las comunidades energéticas locales.

De manera similar, Giri y Mohanty (2022) indican que las ganancias de la agricultura con la tecnología AgroPV son mejores que las obtenidas con prácticas agrícolas tradicionales. Para esto, analizan las ganancias anuales obtenidas para distintas

https://doi.org/10.53010/nys10.02

capacidades instaladas la generación PV, concluyendo que, para cultivos de papa o jengibre, las ganancias para sistemas de 1 kW y 100 kW son de 81,88 y 8 210,42 dólares al año, respectivamente. Estos resultados son congruentes con los obtenidos en este estudio, puesto que, para el sistema diseñado de 14,4 kW el total de ingresos, considerando la venta de excedentes y la producción del cultivo, es de 1 018,5 dólares.

Finalmente, a partir de la revisión de la literatura, la normativa vigente, los impactos ambientales, sociales y económicos determinados, y el alto potencial de los sistemas AgroPV en el país, se recomiendan los siguientes aspectos para su implementación y viabilidad:

- Debe existir una estandarización del concepto de la tecnología APV: se deben definir en un reglamento los requisitos y requerimientos técnicos del sistema, establecer los cultivos que pueden verse beneficiados con la tecnología e identificar las zonas del país donde es factible su implementación.
- Incentivar la inversión privada en la implementación de sistemas AgroPV.
- Promover y permitir mayor adquisición a créditos y fondos por parte de los agricultores, también crear programas y destinar subsidios para cubrir los costos de capital.
- Promover la tecnología en los agricultores del país, así como en comunidades rurales: es muy importante la aceptación por parte de la comunidad y demás agentes involucrados.
- Considerar el establecimiento de una tarifa para la remuneración de los sistemas AgroPV que inyectan energía a las redes locales (venta de excedentes). Esta tarifa debería incluir aspectos como la capacidad instalada del sistema, el tipo de modelo de negocio, las condiciones sociales y económicas de la zona, entre otros.

Conclusiones

La tecnología AgroPV aumenta la eficiencia en el uso del suelo, protege los cultivos de la intensa irradiación solar, incrementando su resiliencia frente al cambio climático. Además, diversifica las fuentes de ingresos de los agricultores, apoya la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y representa una alternativa innovadora y viable para mejorar el servicio eléctrico en las zonas rurales del país, mientras aporta a la seguridad alimentaria de los territorios, optimizando el uso del suelo.

El diseño e implementación de sistemas AgroPV en zonas agrícolas no solo impulsan el desarrollo técnico de la agricultura, sino que también promueven una actividad más amigable con el medio ambiente, gracias al uso de fuentes no convencionales de energía

https://doi.org/10.53010/nys10.02

renovable. Esto contribuye a la descarbonización del sector agrícola y favorece la conservación de recursos naturales, reduciendo su huella de carbono, generando un impacto positivo desde la perspectiva ambiental. Además, el impacto positivo se extiende a las comunidades, ya que se promueve la sustentabilidad económica de sus integrantes y se fomenta una agricultura resiliente.

A través de la innovación en prácticas agroecológicas, como los sistemas AgroPV, se contribuye al desarrollo sostenible, ya que, al integrar los sectores agrícola y energético, la tecnología agrofotovoltaica promueve el cumplimiento de los ODS 2, 7, 9, 12, 13 y 15. Esto facilita la transición hacia un sector agrícola más descarbonizado, resiliente y desarrollado.

Con respecto a la viabilidad económica, debido a la inmadurez de esta tecnología y la falta de proyectos piloto en Colombia, no se puede determinar el modelo de negocio apropiado para ser implementado. La inversión en sistemas AgroPV es significativamente mayor que en sistemas solares fotovoltaicos convencionales, debido a las dimensiones de la estructura, la tecnología de los paneles y la mano de obra requerida. No obstante, a lo largo de 25 años de vida útil, el sistema proporciona beneficios económicos, como una reducción notable en el costo de la electricidad y la generación de ingresos por la venta de excedentes de energía a la red eléctrica.

Factores como los recursos financieros disponibles para los agricultores (acceso a créditos y fondos), la disponibilidad de fondos para la construcción de un sistema AgroPV de carácter social, la participación de inversionistas privados, el comportamiento del mercado eléctrico colombiano y la aceptación comunitaria de la tecnología aún no están completamente definidos ni claros. En términos regulatorios, la política energética nacional es crucial para la implementación de los sistemas AgroPV.

Para promover estos sistemas emergentes, es importante estandarizar el concepto de la tecnología, identificar los cultivos nacionales que podrían beneficiarse, continuar incentivando la inversión privada mediante incentivos económicos y/o sociales, respaldar el acceso a fondos y créditos para pequeños y medianos productores que cubran los costos de inversión, y fomentar la fabricación local de componentes y piezas de las estructuras.

Asimismo, considerando la diversidad agrícola y las necesidades locales, la implementación de proyectos piloto es crucial dada la poca madurez de la tecnología, con el fin de obtener resultados locales en términos de posibles riesgos, impactos ambientales y evaluar la aceptación por parte de las partes interesadas.

Referencias bibliográficas

Agir, S., Derin-Gure, P., y Senturk, B. (2023). Farmers' perspectives on challenges and opportunities of agrivoltaics in Turkiye: An institutional perspective. *Renewable Energy*, *212*, 35-49.

Ai Leon, y Keiichi, N. I. (2018). Assessment of new functional units for agrivoltaic systems. *Journal of Environmental Management*, *226*, 493-498.

Canales, N., y Trujillo, M. (2021). *La red de valor de la yuca y su potencial en la bioeconomía de Colombia*. Instituto de Ambiente de Estocolmo.

Cho, J., Park, S., Park, A. R., Chan Lee, O., Nam, G., y In-Ho Ra. (2020). Application of Photovoltaic Systems for Agriculture: A Study on the Relationship between Power Generation and Farming for the Improvement of Photovoltaic Applications in Agriculture. *Energies*, *13*, 4815.

Cusva García, A. (2022). *Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agricultoras de Colombia*. [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Séneca. http://hdl.handle.net/1992/55211

Dinesh, H., y Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*, 299-308.

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., y Ferard, Y. (2011a). Combining Solar Photovoltaic Panels and Food Crops for Optimizing Land Use: Towards Agrivoltaic Schemes. *Renewable Energy*, *36*, 275-283.

Elamari, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C., y Belaud, G. (2018). Water Budget and crop modelling for agrivoltaic systems: application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, *208*, 440-453.

FAO (2014). *The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture*. The Food and Agricultural Organisation of the United Nations.

Fritsche, U. R., Berades, G., Cowie, A. L., Kline, K. L., Dale, V. H., Johnson, F. X., et al. (2017). *Global land Outlook working paper energy and land use*. 10.13140/RG.2.2.24905.44648.

Giri, N. C., y Mohanty, R. C. (2022). Design of agrivoltaic system to optimize land use for clean energy-food production: A socio-economic and environmental assessment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *24*(9), 2595–2606.

Goetzberger, A., y Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, *1*(1), 55-69.

Gorjian, S., Singf, R., Shukla, A., y Mazhar, A. (2020). On-farm applications of solar PV systems: Technologies, applications and environmental impacts. En *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (Capítulo 6, pp. 147-190).

Gulhane, S. G., y Phadke, A. R. (2023). Design of agro-photovoltaic system for optimized energy generation and crop yield using fuzzy framework. En *2023 2nd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)* (pp. 1-6), Bangalore, India.

Hassanpour Adeh, E., Selker, J. S., y Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology, and water-use efficiency. *PLOS ONE*, *13*(11). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256.

IRENA (2018). *Renewable power generation costs in 2018*. International Renewable Energy Agency, p. 9.

Johnston, M., y Onwueme, L. (1998). Effect of Shade on Photosynthetic Pigments in Tropical Root Crops: yam, Taro, Tannia, Cassava and Sweet Potato. *Experimental Agriculture*, *34*, 301- 312.

Katsikogiannis, O. A., Ziar, H., y Isabella, O. (2022). Integration of bifacial photovoltaics in agrivoltaic systems: A synergistic design approach. *Applied Energy, 309,* 118475.

MADR (2019). *Subsector Productivo de la Yuca. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.* Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales.

MADR (2020). *Plan Departamental de Extensión Agropecuaria 2020-2023*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Bolívar.

Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., y Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, *177*, 117-132.

Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., y Dupraz, C. (2013). Productivity and Radiation Use Efficiency of Lettuces Grown in the Partial Shade of Photovoltaic Panels. *European Journal of Agronomy*, *44*, 54-66.

Muñoz, B., y Romana, M. G. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Matemático*, *6*, 27-46.

Naciones Unidas (2022, 24 de mayo). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

OECD (2019). *Estudios Económicos de la OCDE: Colombia 2019*. OECD Publishing.

Pan, W., Hu, C., Huang, G., Dai, W.-q., y Pan, W. (2024). Energy footprint: Concept, application and modeling. *Ecological Indicators*, *158*, 111459.

Pérez, L., y Gamarra, C. (2018). Colombia: A Mega-Diverse Country in Biodiversity and Ecosystem Services. *Journal of Environmental Protection*, *9*, 1413-1426.

Perna, A., Grubbs, E., Agrawal, R., y Bermel, P. (2019). Design Considerations for Agrophotovoltaic Systems: Maintaining PV Area with Increased Crop Yield. *In 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference* (PVSC) (pp. 0668-0672). IEEE.

Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R., et al. (2016). Colocation opportunities for large solar infrastructures in drylands. *Applied Energy*, *165*, 383-392.

Schindele, S., Trommsdorff, M., Schalaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., *et al.* (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, *265*.

Sekiyama, T., y Nagashima, A. (2019). Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environments*, *6*, 65.

Silalahi, D., Blakers, A., Stocks, M., Bin Lu, Cheng, C., y Hayes, L. (2021). Indonesia´s Vast Solar Energy Potential. *Energies*, *15*, 5424.

Singhal, A., Raina, G., Meena, D. K., y Sinha, S. (2023). Technical feasibility of agro-photovoltaic system in composite climate of India for future sustainability. *In 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)* (pp. 1-6). Bhubaneswar, India.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2019). *Diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia*.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2020). *Boletín tarifario*. Dirección Técnica de Gestión de Energía Superintendencia delegada para la Energía y Gas Combustible.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., y Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. *Agronomy for Sustainable Development*, *39*, 35.

Willockx, B., Reher, T., Lavaert, C., Herteleer, B., Van de Poel, B., y Cappelle, J. (2024). Design and evaluation of an agrivoltaic system for a pear orchard. *Applied Energy*, *353*, 122166.

World Economic Forum. (2009). Annual Report 2008-2009. Disponible en: https://www3.weforum.org/docs/WEF_AnnualReport_2008-09.pdf

Xue, J. (2017). Photovoltaic Agriculture - New Opportunity for Photovoltaic Applications in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *73*, 1-9.

Zainol, M., Mahyuddin, M. A., y Atiqui Mohd, M. (2021). Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review. *Sustainability*, *12*, 7846.

:: :: ::

Sobre este artículo

El artículo está basado en resultados obtenidos por Andrea Cusva García durante sus estudios de maestría en Ingeniería Eléctrica (Universidad de los Andes, 2022) bajo la asesoría del profesor Guillermo Jiménez-Estévez. La tesis titulada "Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agricultoras de Colombia", se encuentra disponible en: http://hdl.handle.net/1992/55211. El presente trabajo fue financiado por Asignación para la CTel-SGR y MinCiencias, bajo el proyecto BPIN 2021000100499. Asimismo, se extienden los agradecimientos a SERC Chile FONDAP/CONICYT Grant 15110019.

↑

Sobre los autores

Andrea Cusva García. Estudiante doctoral de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Contribución al artículo: Metodología, investigación, análisis e interpretación de datos, redacción versión original del artículo. Correo electrónico: ac.cusva10@uniandes.edu.co

↑

Guillermo Jiménez Estévez. PhD., director Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Conceptualización, validación y revisión. Correo electrónico: ga.jimeneze@uniandes.edu.co

↑

Jorge López Jiménez. PhD, asistente posdoctoral Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Edición, revisión y validación de la versión final. Correo electrónico: jorgelopez@uniandes.edu.co

↑

Nicanor Quijano. PhD, profesor titular Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Edición, revisión y validación de la versión final. Correo electrónico: nquijano@uniandes.edu.co

↑