EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Dimensionamiento de un sistema agrovoltaico para el mejoramiento de la producción agrícola del cabildo indígena Zenú en el departamento de Bolívar: caso de estudio cultivo de ají

[1]Andrés Restrepo Álvarez, [1,2]Johan Sebastián Parra Quiroga, [2]Jennyfer Díaz Angulo, [1,2]José Antonio Lara Ramos

[1]Universidad del Valle. Colombia
[2]Simprolab SAS. Colombia

Resumen

En este artículo se presenta el dimensionamiento de un sistema agrovoltaico para un cultivo de ají, adaptado a las condiciones climáticas y edafológicas del cabildo indígena Zenú en el departamento de Bolívar. El dimensionamiento del sistema agrovoltaico parte de conceptos de ingeniería aplicada en la generación y gestión de energía a partir de paneles fotovoltaicos, así como el aprovechamiento en el uso del suelo en actividades agrícolas. En este contexto, la región Caribe, y particularmente el departamento de Bolívar, representa un área de alto potencial para el aprovechamiento de la energía solar, gracias a su elevada radiación diaria promedio. El diseño considera parámetros técnicos clave como la altura y distancia entre paneles solares, con el fin de minimizar el efecto de sombreado sobre el cultivo y asegurar niveles adecuados de radiación solar para su desarrollo. A través de herramientas de simulación, se modela la distribución de la radiación en distintas horas del día y meses del año, lo que permite optimizar el rendimiento tanto del sistema fotovoltaico como del cultivo agrícola. Los resultados permiten establecer una configuración adecuada del sistema agrovoltaico, en términos de eficiencia energética y compatibilidad agronómica, promoviendo el uso sostenible de los recursos y el fortalecimiento de la autonomía energética y alimentaria de comunidades rurales. Esta propuesta contribuye a la transición energética del país, al mismo tiempo que ofrece una alternativa viable para mejorar las condiciones de vida y producción en sectores históricamente marginados del sistema eléctrico nacional, no solo para el uso de la energía eléctrica en actividades agrícolas, sino también en el cubrimiento de necesidades básicas como la iluminación, conservación de alimentos, entre otras.

Palabras clave: agrovoltaica; producción agrícola; sostenibilidad; energías renovables; comunidades indígenas

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4476

Abstract

This article presents the sizing of an agrivoltaics system for a chili pepper crop, adapted to the climatic and edaphological conditions of the Zenú Indigenous Council in the department of Bolívar. The system's design is based on applied engineering concepts for energy generation and management using photovoltaic panels, as well as efficient land use in agricultural activities. In this context, the Caribbean region—particularly Bolívar—represents a high-potential area for solar energy exploitation due to its high average daily solar radiation. The design considers key technical parameters such as the height and spacing between solar panels to minimize shading effects on the crop and to ensure adequate solar radiation levels for optimal plant development. Through simulation tools, solar radiation distribution is modeled at different hours of the day and throughout the year, allowing for the optimization of both the photovoltaic system's performance and agricultural productivity. The results help determine an appropriate configuration for the agrivoltaics system in terms of energy efficiency and agronomic compatibility, promoting the sustainable use of resources and strengthening the energy and food autonomy of rural communities. This proposal contributes to the country's energy transition while offering a viable alternative to improve the living and production conditions in areas historically marginalized from the national electric grid—not only for agricultural energy use but also for covering basic needs such as lighting, food preservation, and more.

Keywords*: agrivoltaics; agricultural production; sustainability; renewable energy; indigenous communities*

1. Introducción

La seguridad alimentaria y energética de una población es quizás una de las metas priorizadas por los lideres regionales y nacionales, teniendo en cuenta la incertidumbre producto de potenciales cambios generados por el aumento de la población mundial y el fenómeno de cambio climático.

El fortalecimiento de la producción energética y alimentaria surge como un desafío clave para generar resiliencia en los diferentes actores del sector productivo, que permita direccionar sus estrategias de la mano de las políticas de estado en cuanto a la transición energética y seguridad alimentaria. Es por esto que, desde hace un par de décadas, el gobierno colombiano promueve la legislación para sostener e incrementar la cobertura eléctrica en el país. La Ley 697, promulgada en 2001, establece que el uso racional y eficiente de la energía es un tema de interés social, público y nacional. Bajo esta ley se ha establecido el PROURE (Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes de Energía No Convencionales) y otros programas como el FAZNI (Fondo de Apoyo Financiero para la Electrificación de Zonas No Interconectadas) los cuales han desarrollado el "Financiamiento de proyectos para la construcción e instalación de la nueva infraestructura eléctrica y para su colocación o rehabilitación de la existente, con el fin de ampliar la cobertura y asegurar la satisfacción de la demanda energética en las zonas no interconectadas (ZNIs)". Actualmente, el gobierno está incentivando el consumo de energías renovables en el país a través de la Política de Desarrollo Energético (PEN2050), leyes como la 1715 de 2014, 2036 de 2020, 2099 de 2021 (Ley 2099 de 2021, 2021) y la iniciativa de Colombia Inteligente.

Particularmente, la región Caribe tiene un enorme potencial y todas las condiciones climáticas para ser un referente en el desarrollo de energía renovables como la eólica y solar. En la mayoría de los municipios de la costa Caribe son favorables la implementación de una mayor cantidad de sistemas de generación de energía, por la cantidad de radiación a causa de las horas de sol diurnas. Incluso, se estima que la radiación media de la región caribe es de 6 $kWh/m^2/d$ comparables con las de mayor potencial del mundo como lo son: el desierto de Atacama, en Chile, y Arizona y Nuevo México, en Estados Unidos. A pesar de esto aún hay muchas zonas rurales donde habitan comunidades indígenas y campesinas con insuficiencia energética por lo cual se hace indispensable continuar con la construcción de líneas de transmisión y otros sistemas pequeños que son importante para los abastecimientos de comunidades rurales desconectadas del suministro eléctrico dentro de la misma región Caribe (Chalgynbayeva et al., 2023). En el caso particular del departamento de Bolívar, según su Plan Departamental de Desarrollo 2020-2023, el departamento de Bolívar tiene una cobertura del 98%, el servicio en muchos municipios es deficiente lo que impacta negativamente la productividad y competitividad de los pequeños y medianos productores agrícolas. Incluso estas condiciones de vulnerabilidad la enfrentan a asociaciones de agricultores ubicadas en municipios del departamento que se encuentran solo a 30 minutos de la capital Cartagena de Indias como Turbaco, Santa Rosa de Lima, Santa Catalina y Villanueva.

Es en este contexto, es donde surge la necesidad de propuestas que consideren fortalecer las capacidades técnicas de los productores agrícolas del departamento a través de propuestas que brinden alternativas de generación de energía eléctrica y disposición de la misma en actividades residenciales y/o de producción agrícola, en los mismos terrenos donde se cultiva sin necesidad de conectarse a una infraestructura de gran escala, ni que generen competencia por el uso del suelo cultivado con el fin de no afectar la seguridad alimentaria de las comunidades (Stallknecht et al., 2023). Esta combinación de actividades de generación de energía eléctrica a partir de energías renovables como la solar (en la cual el departamento de Bolívar es potencia) con la producción agrícola se conoce como sistemas agrovoltaicos (Clandestino Muñoz, 2020; Mamun et al., 2022), los cuales permiten aportar a la reducción de potencial contaminante, la productividad agrícola y transición energética del país (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2022; Reasoner & Ghosh, 2022; Xue, 2017).

En este trabajo se presenta el dimensionamiento de un sistema agrovoltaico para un cultivo de ají, teniendo en cuenta las condiciones ambientales y propiedades del suelo que se producen en el microclima que experimenta el cultivo de estudio debido al sombreado que los mismos paneles solares generan durante el día. Adicionalmente, el dimensionamiento de los parámetros de diseño del sistema agrovoltaico incluye la distancia de separación entre paneles solares, altura respecto al cultivo que permitan proyectar a través de simulación el área efectiva de radiación en diferentes horas del día y en los diferentes meses del año para que el cultivo pueda desarrollarse en condiciones seguras. Finalmente, teniendo en cuenta los parámetros de dimensionamiento se realiza la implementación del sistema agrovoltaico para un cultivo de ají en el cabildo indígena Zenú en el departamento de bolívar.

2. Dimensionamiento del sistema agrovoltaico

2.1. Selección de cultivo

De acuerdo con (Barron-Gafford et al., 2019), la unión de las actividades agrícolas y de producción de energía solar fotovoltaica genera solo ventajas para ambos componentes (Chalgynbayeva et al., 2023), sin embargo, en (Ehret M, 2015) se observa el caso contrario al documentarse pérdidas en la productividad del 50% bajo un sombreado del 80% para especies de trébol blanco. Esto, sumado a un mejor manejo de la tierra y el agua disponible, convierten a los sistemas agrovoltaicos en opciones win-win (todos ganan). Gracias a este estudio, realizado por investigadores de la Universidad de Arizona, en el cual fueron monitoreadas las variables microclimáticas, tales como: la temperatura de los paneles solares, humedad del suelo y el uso del agua en los sistemas de riego; además de parámetros de los cultivos como su función fisiológica y la producción de biomasa, se obtuvieron resultados positivos tanto para los paneles solares como para los cultivos. También, allí se concluyó que el sombreado generado por los paneles solares redujo el estrés por sequía en cultivos de ají Chiltepin, jalapeño y tomates Cherry, aumentando también su producción. Puntualmente, se encontró: una producción tres veces superior para el ají Chiltepin; dos veces para el tomate y para el jalapeño, pero con un 65% menos de pérdidas de agua por transpiración.

Teniendo en cuenta lo anterior y el interés de la comunidad indígena Zenú, se seleccionó el cultivo de ají como caso de estudio para el dimensionamiento e implementación del sistema agrovoltaico. Por lo tanto, se considera un área de cultivo de 4 m x 4 m como se presenta en la Figura 1.

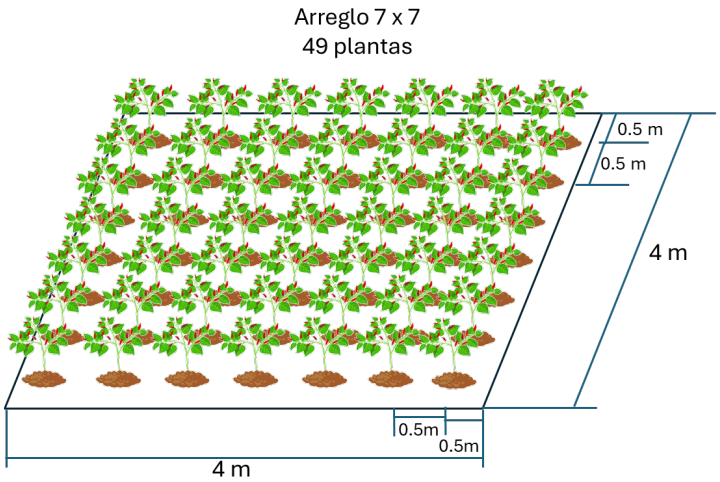


Figura 1. Arreglo de plantas para el cultivo de ají del sistema agrovoltaico.

2.2. Criterios de diseño para la construcción del sistema agrovoltaico

Para optimizar la instalación de paneles solares en un sistema agrovoltaico, es crucial determinar el espacio adecuado entre los paneles solares y los cultivos. Aquí se presentan las consideraciones clave:

Espacio entre paneles solares

Prevención de Sombreado: Es fundamental calcular la distancia entre las filas de paneles solares para evitar que se produzca sombra sobre los cultivos. Esto se puede lograr utilizando un coeficiente basado en la latitud del lugar y la altura de los paneles solares. Por ejemplo, si la altura del panel es conocida, se puede calcular la distancia mínima necesaria para garantizar al menos cuatro horas de sol alrededor del mediodía durante el solsticio de invierno.
Altura de los Paneles solares: Instalar los paneles solares a una altura adecuada (por ejemplo, entre 3 y 5 metros) permite que la luz solar llegue a los cultivos sin interferencias significativas. Esto también facilita el manejo de maquinaria agrícola.

Diseño del sistema agrovoltaico

Configuración Elevada: Los paneles solares pueden ser instalados sobre estructuras elevadas que permiten el crecimiento de cultivos debajo, maximizando el uso del terreno. Esta configuración ayuda a proteger los cultivos de condiciones climáticas adversas, como granizo y altas temperaturas.
Cultivos Intercalados: En algunos sistemas, los paneles solares y los cultivos pueden ser intercalados, lo que permite una mejor distribución de la luz solar y el aprovechamiento del espacio.

Metodologías y modelos

Simulaciones Matemáticas: Investigaciones recientes han desarrollado modelos que simulan la distribución de la radiación solar entre las filas de paneles solares y cultivos. Estos modelos ayudan a identificar las zonas cultivables sin afectar la producción fotovoltaica ni generar sombras.
Cultivos Compatibles: Es importante seleccionar cultivos que puedan prosperar con menos luz directa, como aquellos que no superen una altura específica (por ejemplo, 1.4 metros) para maximizar el rendimiento tanto agrícola como energético.

2.3. Cálculos para la instalación del sistema

Para calcular la distancia necesaria entre paneles solares (2 filas de 4 paneles solares cada una) en un área de plantación de ají de 4 m x 4 m, considerando que cada panel tiene dimensiones de 148 cm x 67 cm y un ángulo de inclinación de 10 grados, podemos seguir los siguientes pasos:

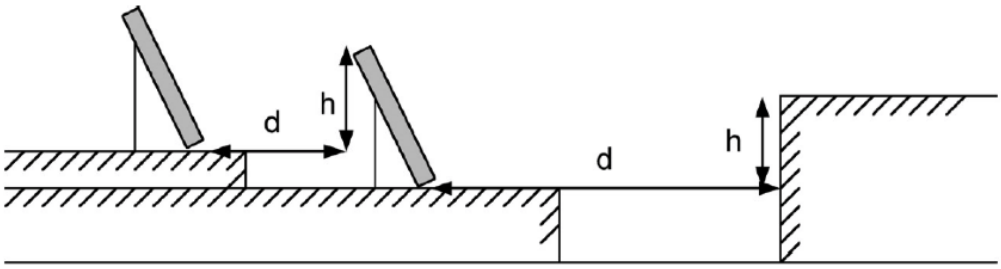


Figura 2. Parámetros de distancia de separación entre arreglo de paneles solares.

Cálculo de la altura máxima del panel (h)

La altura máxima del panel se calcula usando la fórmula:

$$h = a \cdot sin(\alpha) \quad [1]$$

donde:

- a es la longitud del panel (1.48 m = 148 cm).
- α es el ángulo de inclinación (10 grados).

Calculando *h*:

$$h = 148\ cm \cdot sin(10\ \circ) \approx 148 \cdot 0.1736 \approx 25.7cm$$

Cálculo del coeficiente k

El coeficiente k depende de la latitud del lugar donde se instalarán los paneles solares (Camero, 2021). En este caso el lugar de instalación se encuentra en las coordenadas (10.188881, -75.371423), supongamos una latitud típica en la región Caribe de Colombia, que es aproximadamente 10°N.Usando la fórmula:

$$k = \frac{1}{tan(61 - latitud)} \quad [2]$$

Sustituyendo la latitud:

$$k = \frac{1}{tan(61 - 10.188881)} = \frac{1}{tan(50.811119)} \approx 0.815$$

Cálculo de la distancia mínima (d)

Finalmente, calculamos la distancia mínima entre las filas de paneles solares usando:

$$d = k \cdot h \quad [3]$$

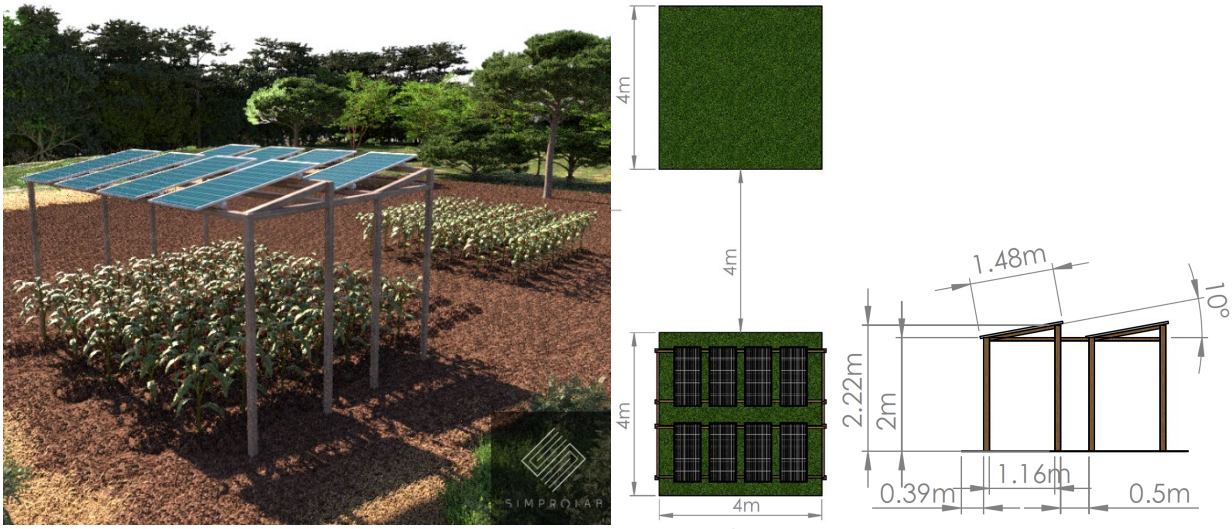
Sustituyendo los valores:

$$d = 0.815 \cdot 25.7 \approx 21cm$$

3. Modelo computacional

Por medio del modelo computacional del sistema agrovoltaico se realiza la validación de los parámetros de diseño con respecto a las sombras generadas con la variación de la posición del sol durante diferentes horas del día y diferentes meses del año, lo cual permitió asegurar por una parte un área delimitada de cultivo y la generación de energía eléctrica para su aprovechamiento en actividades agrícolas y en el cubrimiento de necesidades básicas como la iluminación, conservación de alimentos, entre otras. En la figura 3 se presentan los resultados del modelo computacional realizado en Cinema 4D® y las dimensiones de los cultivos de ají con y sin paneles

solares, así como las dimensiones de la estructura que soporta los paneles solares en el sistema agrovoltaico para el cabildo indígena Zenú en el departamento de Bolívar.



(a) (b) (c)

Figura 3. Modelo computacional del sistema agrovoltaico para los cultivos de ají con y sin paneles solares. (a) Modelo computacional en Cinema 4D®. (b) Dimensiones de cultivos y separación. (c) Dimensiones estructura de paneles solares.

Teniendo en cuenta las dimensiones del sistema agrovoltaico propuesto se utilizan diferentes herramientas computacionales para evaluar las trayectorias del sol en diferentes horas del día y en los diferentes meses del año con el propósito de verificar el área de sombreado que genera la estructura y los paneles solares en los cultivos de ají. Inicialmente, se realiza en Cinema 4D la simulación de la sombra generada por la estructura de paneles solares en diferentes horas del día. En la Figura 4 se presentan las imágenes de las sombras generadas cada 2 horas desde las 7 am hasta las 5 pm, consideran la posición del sol exactamente perpendicular a la superficie de la tierra en el medio día (12 m).

Figura 4. Simulación en Cinema 4D para diferentes horas del día en el cultivo de ají.

Adicionalmente, se realizaron simulaciones usando el software 3D Sun Path® (Marsh, 2014) considerando los diferentes días del año y las diferentes horas del día con el propósito de encontrar el peor escenario que pueda generar sombra entre el arreglo de filas de paneles solares y el cultivo de ají que no tiene paneles solares.

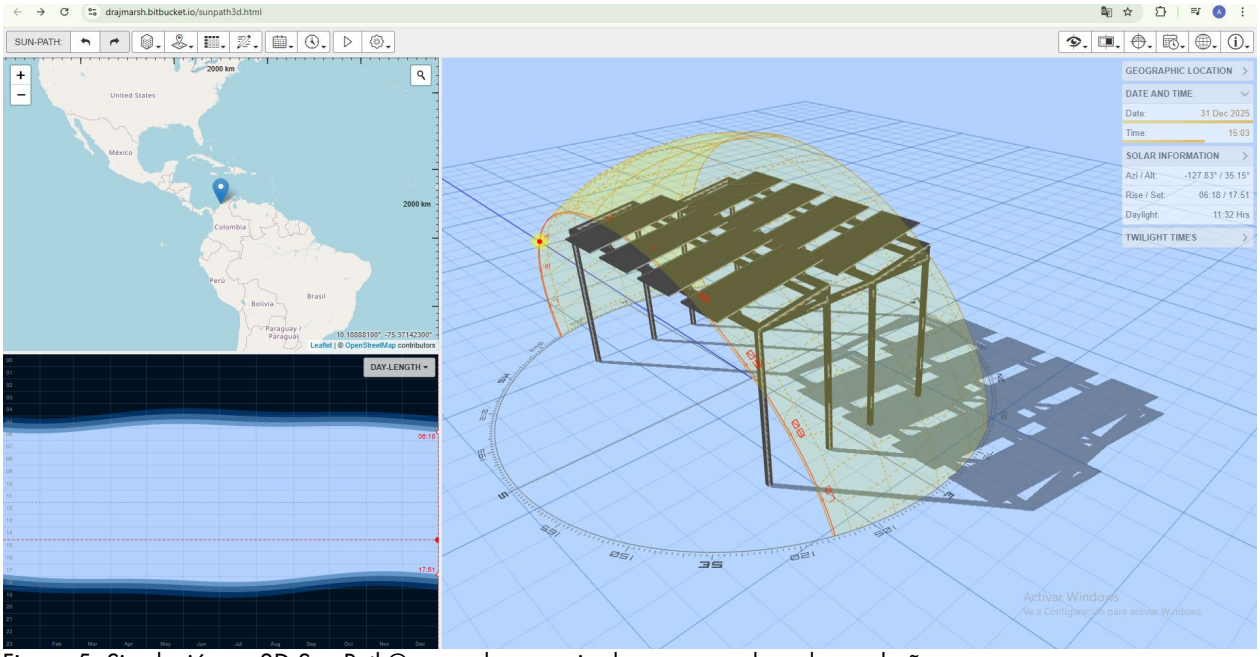


Figura 5. Simulación en 3D Sun Path® para el escenario de mayor sombreado en el año.

Teniendo en cuenta los resultados de las Figuras 4 y 5, es importante garantizar la instalación de los paneles solares con la caída de inclinación en dirección hacia el Sur del sistema de coordenadas geográfico, esto con el objetivo que el recorrido del sol para la mayoría de los días en el año se ubique sobre el cultivo y genera sombra en dirección a la trayectoria del sol desde el amanecer hasta el ocaso. En la figura 5 se puede observar que en los meses de diciembre y enero se presentan sombras que se acercan al cultivo sin paneles solares, pero con la distancia definida de 4 metros no se tiene problema de sombreado sobre el cultivo. Por otra parte, se puede observar que el sombreado entre el arreglo de filas de paneles solares para estos meses del año empieza a generar sombreado entre las filas de paneles solares después de las 3 pm.

4. Implementación del sistema agrovoltaico

Los resultados de simulación permiten validar el diseño conceptual no solo de la distancia de separación entre cultivos de ají con y sin paneles solares, sino también de la distancia de separación entre las filas de paneles solares en el sistema agrovoltaico, así como la altura, inclinación y dirección de instalación de los paneles solares. En la siguiente figura se presenta la implementación del sistema agrovoltaico para cultivo de ají en el cabildo indígena Zenú del municipio de Turbaco – Bolívar con capacidad de generación de energía eléctrica de 1.2 kW pico, el cual consiste en un arreglo de 8 paneles solares de 165 W cada uno, un cargador-inversor de 3 kW y un arreglo de 4 baterías de Gel de 200 Ah a 12 VDC.

Figura 6. Implementación del sistema agrovoltaico para cultivo de ají

5. Conclusión

Los sistemas agrovoltaicos surgen como una alternativa viable para mejorar las condiciones de vida y producción en sectores agrícolas. Por lo tanto, los criterios de selección de los cultivos y el dimensionamiento de los sistemas agrovoltaicos toman una gran importancia para que los pequeños y medianos productores agrícolas que buscan herramientas agiles de diseño e implementación de estos sistemas. En este trabajo se presentó el dimensionamiento de un sistema

agrovoltaico para cultivo de ají que permita el mejoramiento de la producción agrícola del cabildo indígena zenú en el departamento de Bolívar. Como resultado se determinó que la distancia mínima recomendada entre las filas de paneles solares, considerando un factor de corrección en los cálculos teóricos, debe ser aproximadamente 40 cm para evitar sombras entre el arreglo de filas de los paneles solares sobre el cultivo de ají en un área de 4 m x 4 m. Además, se definió una distancia de 4 m con respecto a otro cultivo de ají sin paneles solares con el propósito de realizar la comparación de la productividad entre los dos cultivos. Esta separación permitirá que tanto los paneles solares como los cultivos aprovechen al máximo la luz solar disponible.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Laboratorio de Simulación y Procesos SAS (Simprolab, 2025) y al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (MINCIENCIAS) de Colombia por su apoyo a través de la convocatoria 934-2023 CONVOCATORIA DE ESTANCIAS POSDOCTORALES ORIENTADAS POR MISIONES, que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

7. Referencias

- Barron-Gafford, G., Pavao-Zuckerman, M., Minor, R., Sutter, L, Barnett-Moreno, I., Blackett, M. T. D., Dimond, K., Gerlak, A., Nabhan, G. y Macknick, J. (2019). Agrivoltaic provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands, Nature Sustainability, vol. 2.
- Chalgynbayeva, A., Gabnai, Z., Lengyel, P., Pestisha, A., & Bai, A. (2023). Worldwide Research Trends in Agrivoltaic Systems; A Bibliometric Review. Energies, 16(2). https://doi.org/10.3390/en16020611
- Camero, Gary (2021). Cálculo y dimensionamiento de instalaciones solares fotovoltaicas en oficinas. Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética, Universidad de Barcelona. Barcelona – España. Consultado el 15 de enero de 2025 en https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/180179/1/TFM_MERSE%20Gary%20Camero.pdf
- Clandestino Muñoz, F. V. (2020). Generación energética de sistemas agrovoltaicos bifaciales en el Valle de Lluta [Trabajo de grado]. Universidad de Chile. Santiago de Chile – Chile. Consultado el 15 de enero de 2025 en https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176196/Generaci%c3%b3n-energ%c3%a9tica-de-sistemas-agrovoltaicos-bifaciales-en-el-Valle.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ehret M, G. R. W. M. (2015) The effect of shade and shade material on white clover/perennial ryegrass mixtures for temperate agroforestry systems, Agrofor Syst, vol. 89, pp. 557-570.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2024). Agrivoltaics Opportunities for Agriculture and the Energy Transition: A guideline for Germany. Consultado el 15 de enero de 2025 en https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf
- Laboratorio de Simulación y Procesos SAS (2025). Tecnología con Propósito: Co-Creando Soluciones en Turbaco. Consultado el 15 de enero de 2025 en https://es.linkedin.com/posts/simprolab_innovaci%C3%B3nsostenible-transferenciadetecnolog%C3%ADa-activity-7305979332152225792-94Mi?utm_source=li_share&utm_content=feedcontent&utm_medium=g_dt_web&utm_campaign=copy

- Ley 2099 de 2021 (2021). Pub. L. No. 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. Consultado el 15 de enero de 2025 en https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326
- Mamun, M. A. Al, Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., & Aziz, A. A. (2022). A review of research on agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112351. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351
- Marsh, Andrew J. (2014). 3D Sun Path®. Consultado el 15 de enero de 2025 en https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath3d.html
- Reasoner, M., & Ghosh, A. (2022). Agrivoltaic Engineering and Layout Optimization Approaches in the Transition to Renewable Energy Technologies: A Review. Challenges, 13(2). https://doi.org/10.3390/challe13020043
- Stallknecht, E. J., Herrera, C. K., Yang, C., King, I., Sharkey, T. D., Lunt, R. R., & Runkle, E. S. (2023). Designing plant–transparent agrivoltaics. Scientific Reports, 13(1), 1903. https://doi.org/10.1038/s41598-023-28484-5
- Xue, J. (2017). Photovoltaic agriculture - New opportunity for photovoltaic applications in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, 1–9. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.098

Sobre los autores

- **Andrés Restrepo**: Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería con énfasis en Automática, Doctor en Ingeniería énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Investigador Posdoctoral de proyecto de sistema agrovoltaico con la empresa SIMPROLAB SAS y docente hora cátedra de la Universidad del Valle sede Yumbo. andres.restrepo@correounivalle.edu.co
- **Jhoan Parra**: Ingeniero Electrónico, Máster en Ingeniería con énfasis en Automática, Estudiante de Doctorado en Ingeniería énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Investigador de la empresa SIMPROLAB SAS. jhoan.parra@correounivalle.edu.co
- **Jennyfer Díaz:** Ingeniera Química de la Universidad de Cartagena, Máster en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Química, Doctora en Ingeniería énfasis en Ingeniería Química de la Universidad del Valle. Investigadora de la empresa SIMPROLAB SAS. jennyfer.da@gmail.com
- **José Lara**: Ingeniero Químico de la Universidad de Cartagena, Máster en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Química, Doctor en Ingeniería énfasis en Ingeniería Química de la Universidad del Valle. Profesor Ocasional Tiempo Completo Universidad del Valle. lara.jose@correounivalle.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)