

VIABILIDAD ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS AGRIVOLTAICOS EN COLOMBIA*

Carlos Harvey Salamanca Falla**
Juan Sebastian Babativa Torres***
Andrés David Bahamon Sáenz****

Recibido 9 de septiembre de 2023 – Aprobado: 17 de marzo 2024

<https://doi.org/10.22395/seec.v27n62a4561>

RESUMEN

Un sistema agrivoltaico es un enfoque estratégico e innovador para combinar la energía renovable con la producción agrícola. En la literatura, muchos estudios describen las ventajas de los sistemas agrivoltaicos desde diferentes puntos de vista. Sin embargo, se necesita un análisis más profundo de estos sistemas para comprender su viabilidad económica y su compatibilidad con los principales cultivos agrícolas en Colombia, como por ejemplo el cultivo de café. Es por esta razón que se realizó una revisión literaria con el fin de determinar el estado actual de esta tecnología en Colombia y determinar su viabilidad, así como definir los principales beneficios que genera este sistema. Se realizó un análisis de la implementación en otros países y posterior a eso se realizaron los supuestos para determinar costos y estimar la rentabilidad de este basados en la simulación de un caso de estudio. Como resultados de la investigación se obtiene que en los diseños propuestos para el sistema agrivoltaico, la rentabilidad esperada es positiva de hasta 9 %, con una recuperación de la inversión a mediano plazo. Esto presenta una gran aproximación a la implementación de sistemas agrivoltaicos en el Huila y su compatibilidad con el cultivo de café.

PALABRAS CLAVE

Agrovoltaica; energía solar; economía sostenible; productividad; sostenibilidad energético-alimentaria.

CLASIFICACIÓN JEL

O13, Q10, Q42

CONTENIDO

Introducción; 1. Sistema Agrivoltaico; 2. Materiales y métodos; 3. Resultados y discusión; 4. Conclusiones; Referencias

* Trabajo de investigación, producto del semillero de investigación Kairos del grupo CREA de la Facultad de Economía y Administración de la Universidad Surcolombiana. El cual fue clasificado por MinCiencias en la categoría B en 2021. Este proyecto fue financiado con recursos propios y se llevó a cabo durante los años 2021 y 2022.

** Administrador de Empresas, Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia. Especialista en Finanzas, Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia. Magíster en Finanzas Internacionales, skema Business School, Sophia Antipolis, Francia. Magíster en Finanzas Internacionales, Universidad de Westminster, Londres, Gran Bretaña. Candidato a Doctor en Administración, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Profesor de la Facultad de Economía y Administración, Universidad Surcolombiana. Neiva, Colombia. Carlos.salamanca@usco.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4401-5293>

*** Economista, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. babativa9@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8490-221X>

**** Estudiante de economía, Universidad Surcolombiana. Neiva, Colombia. u20201186828@usco.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0489-7604>

ECONOMIC VIABILITY OF AGRIVOLTAIC SYSTEMS IN COLOMBIA

ABSTRACT

An agrivoltaic system is a strategic and innovative approach that combines renewable energy with agricultural production. Several existing studies describe the advantages of agrivoltaic systems from different points of view. However, a deeper analysis of these systems is needed to understand their economic viability and their compatibility with the main agricultural products in Colombia, such as coffee. A literature review was conducted with the aim to determine the current status and economic viability of this technology in Colombia, as well as define the main profits generated by this system. Additionally, an analysis of the implementation of this technology in other countries was carried out to determine the costs and estimate the profitability of this system based on the simulation of a case study. The results of the research revealed that in the proposed designs for the agrivoltaic system, the expected profitability is up to 9% with a return of investments in the medium term. This presents a great approximation to the implementation of agrivoltaics systems in Huila and their compatibility with coffee cultivation.

KEY WORDS

Agrovoltaica; solar energy; sustainable economy; productivity; energy-food sustainability.

JEL CLASSIFICATION

O13, Q10, Q42

CONTENT

Introduction; 1. Agrivoltaic System; 2. Materials and Methods; 3. Results and Discussion; 4. Conclusions; Bibliographical references

VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS AGROVOLTAICOS DA COLÔMBIA

RESUMO

Um sistema agrovoltaico é uma abordagem estratégica e inovadora para combinar energias renováveis com a produção agrícola. Na literatura, muitos estudos descrevem as vantagens dos sistemas agrovoltaicos de diferentes pontos de vista. No entanto, é necessária uma análise mais profunda destes sistemas para compreender a sua viabilidade econômica e a sua compatibilidade com as principais culturas agrícolas da Colômbia, como a cultura do café. Por esta razão, foi realizada uma revisão da literatura para determinar o estado atual desta tecnologia na Colômbia e determinar a sua viabilidade, bem como para definir os principais benefícios gerados por este sistema. Foi feita uma análise da implementação em outros países e, em seguida, foram feitas suposições para determinar os custos e estimar a rentabilidade deste sistema com base na simulação de um estudo de caso. Os resultados da investigação mostram que nos projectos propostos para o sistema agrovoltaico, a rentabilidade esperada é positiva em até 9% com uma recuperação do investimento a médio prazo. Isto apresenta uma grande aproximação à implementação de sistemas agrovoltaicos na Huila e a sua compatibilidade com a cultura do café.

PALAVRAS CHAVE

Agrovoltaica; energia solar; economia sustentável; produtividade; sustentabilidade energético e alimentar.

CLASSIFICAÇÃO JEL

O13, Q10, Q42

CONTEÚDO

Introdução; 1. Sistema Agrovoltaico; 2. Materiais e Métodos; 3. Resultados e Discussão; 4. Conclusões; Referências Bibliográficas

INTRODUCCIÓN

Un sistema Agrivoltaico es aquel que permite de forma simultánea la producción de energía solar fotovoltaica (electricidad) en la misma área de un cultivo agrícola, optimizando ambos sistemas de producción (Dupraz *et al.*, 2011). Por lo tanto y a diferencia de un sistema fotovoltaico tradicional, el sistema agrivoltaico se construye en estructuras que ofrecen más flexibilidad en la gestión de la luz (por ejemplo, control de sombras) tanto para la agricultura como para la generación de energía. Es así que la aplicación de un sistema solar fotovoltaico actualmente tiene un gran potencial para ayudar a contrarrestar los efectos producidos por el cambio climático, ya que puede proteger las plantas y la tierra de efectos ambientales, como la erosión que se produce en zonas de alta radiación solar, contribuyendo a la conservación y resiliencia del clima en zonas dedicadas al cultivo y aumentando la productividad de la tierra (Amaducci *et al.*, 2018).

Los sistemas agrivoltaicos han sido recientemente implementados en países como Alemania mostrando grandes resultados como la generación de energía renovable sin afectar negativamente la productividad de los cultivos (Amaducci *et al.*, 2018), y mejorando la incorporación entre la producción de alimentos y energía, dando un nuevo uso a la tierra. Además, puede generar beneficios para el crecimiento de diferentes tipos de cultivos gracias a las sombras generadas, en este caso, por los paneles solares. En términos de productividad, para cultivos tolerantes a la sombra y que implementen sistemas agrivoltaicos, estos podrían maximizar el uso de la tierra de manera eficiente entre un 35 y un 73 %, con un 50 % de la radiación solar entrante de los paneles fotovoltaicos (Hassanien *et al.*, 2016). En cuanto a polinización, la abundancia floral es mayor en las parcelas de sombra parcial, donde se genera un 4 % más floraciones que en cultivos a plena exposición solar (Graham *et al.*, 2021). Adicionalmente, cuando los paneles funcionan correctamente, su sombra paralela reduce el consumo de agua por parte de las plantas, como consecuencia de la alternancia de sombra y luz solar (Elamri *et al.*, 2018).

A pesar de que, en la literatura, muchos estudios describen las ventajas de los sistemas agrivoltaicos desde diferentes puntos de vista, como: optimización del uso de la tierra, aumento de la productividad tanto en el sector de la energía como del agua, beneficios económicos, etc., aún es necesario realizar un análisis más profundo de estos sistemas. Con la finalidad de comprender su viabilidad económica y su compatibilidad con los principales cultivos en Colombia —como por ejemplo el cultivo de café— donde además se ha demostrado que las sombras permanentes en este sistema productivo pueden mejorar su rendimiento (Bote y Struik, 2011; Villarreyña y Rogelio, 2016).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo principal de este trabajo fue realizar una revisión del estado actual de la introducción de los sistemas agrivoltaicos en Colombia para determinar su viabilidad económica y su compatibilidad con los principales cultivos del país.

1. SISTEMA AGRIVOLTAICO

Varios estudios sobre sistemas agrivoltaicos se han desarrollado en el ámbito internacional. El concepto trabajado por Leon y Ishihara definen un sistema agrivoltaico como aquel que permite la generación de energía mediante módulos fotovoltaicos, donde se combina con la producción de cultivos en el mismo terreno, ya sea en una instalación en el suelo entre los cultivos en sustitución de una parte del invernadero, o colocándolos por debajo o por encima de la cubierta del invernadero (Leon y Ishihara, 2018). Además, estos sistemas pueden proporcionar soluciones con respecto a la competencia por el uso del terreno y la mitigación del cambio climático. De forma similar en China se han hecho experimentos, donde se presentan los sistemas agrivoltaicos como una oportunidad para resolver la competencia por el uso del suelo entre la producción de alimentos y energía, ya que los paneles fotovoltaicos están lo suficientemente elevados por encima de la tierra de cultivo con una distancia equidistante entre filas, que es aproximadamente tres veces la altura de los paneles fotovoltaicos (Zheng *et al.*, 2021). De esta manera, los cultivos pueden crecer utilizando la luz solar distribuida entre las filas de los paneles fotovoltaicos, aprovechando la luz difusa, tal como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Fotografías de un sistema agrivoltaico en Fuyang of Anhui, China.



Fuente: tomado de Zheng *et al.* (2021, p. 8).

La presencia de luz difusa —es decir, aquella que no entra en contacto directo con las plantas— podría expandir el uso de granjas solares existentes al incluir cultivos de vegetación nativa que sean tolerantes a la sombra debajo de paneles o permitir que cierto ganado se alimente dentro de una granja solar (Dolezal *et al.*, 2021). Finalmente, la presencia de paneles solares en áreas de cultivos permite la tecnificación y automatización de estos al proporcionar una fuente limpia de energía eléctrica que puede ser direccionada para el uso de máquinas (sistemas de bombeo, calefacción, etc.), principalmente en aquellas que no tienen acceso a la red eléctrica (Taki *et al.*, 2018). A su vez, el desarrollo de tecnologías permite incrementar la producción, con aprovechamiento eficiente de la mano de obra, los insumos, reducción de costos y control de contaminación de más de 90 % (Oliveros-Tascón y Sanz-Uribe, 2011).

Al no necesitar de un terreno adicional, los sistemas agrivoltaicos podrían aumentar entre un 35 % y un 73 % la productividad global del terreno destinado para cultivo, además de incrementar el valor económico en más del 30 % cuando la generación de energía se combina con el sistema productivo tolerante a la sombra (Leon y Ishihara, 2018). Estos datos concuerdan con lo reportado por Gonocruz, *et al.* (2021) para un cultivo de arroz en Japón. Al tener un porcentaje de sombreado entre el 27 y el 39 %, es posible obtener el 80 % del rendimiento de la producción de arroz.

Los resultados experimentales mostraron que el rendimiento de grano está positivamente correlacionado con la radiación solar, lo cual es consistente con la correlación entre el rendimiento de grano y la radiación solar durante las etapas de reproducción y maduración (Gonocruz *et al.*, 2021). También, se espera que los sistemas agrivoltaicos puedan aumentar los ingresos de los agricultores hasta 5 veces, al combinar beneficios como la sustitución de cultivos intolerantes a la sombra por cultivos tolerantes; se puede proteger los cultivos de la erosión del suelo, reducir la evaporación del agua, automatizar procesos, poner a la venta excedentes de energía producida, e incluso reducir la emisión de gases de efecto invernadero, ya que se estima que la instalación de 23 kW podría mitigar 554 toneladas de CO² durante la vida útil (Zheng *et al.*, 2021). Así mismo, en granjas solares ya construidas se propone la inclusión de sistemas agrícolas, como la apicultura (Dolezal *et al.*, 2021), tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Implementación de un sistema agrivoltaico en conjunto con un colmenar de abejas en la granja Aurora solar, Minnesota.



Fuente: Tomado de (Dolezal *et al.*, 2021, p. 2).

Feuerbacher *et al.* (2021), en el año 2021, desarrolló un método para evaluar los beneficios económicos del modelo propuesto, donde concluye que las tierras cultivadas bajo un sistema agrivoltaico podrían reducir su rendimiento en un 40.3 % debido a la pérdida del área de cultivo dedicada para la estructura de montaje agrivoltaico, la disminución del rendimiento de los cultivos producto del sombreado, los mayores costos de maquinaria y mano de obra. Además, el costo de un sistema agrivoltaico podría ser de hasta un 38 % más alto en comparación con un sistema fotovoltaico tradicional. La pérdida de rendimiento del cultivo puede ser mitigada al seleccionar un tipo de cultivo compatible con las sombras generadas por los paneles, como es el caso del trigo (*Triticum L.*), donde se percibió un ligero retraso en su maduración, pero no afectó la producción de la cosecha (Weselek *et al.*, 2021).

1.1. Rentabilidad de la inversión en un sistema agrivoltaico

El aumento de la demanda de energía en combinación con la contaminación ambiental ha llevado a los países a invertir en la producción de energías renovables. Las inversiones en energía renovable son motores de crecimiento y contribuyen al desarrollo de las sociedades locales (Zografidou *et al.*, 2017). Para el caso de los sistemas agrivoltaicos, varios autores han demostrado que la rentabilidad puede ser determinada por el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) (Poonia *et al.*, 2022), el retorno de la inversión (ROI) (Zheng *et al.*, 2021) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) (Agostini *et al.*, 2021).

1.2. Costo de invertir en sistemas agrivoltaicos

Para adoptar un sistema agrivoltaico, los agricultores incurren en todo tipo de costos tanto variables como fijos, los cuales ejercen una influencia en los resultados de la inversión. Estudios previos indican que los ingresos y costos varían según las condiciones específicas del mercado de energía, su ubicación y diseño de los sistemas agrivoltaicos. En el año 2020, un estudio realizado por Schindele, *et al.* (2020) en Alemania, valoraron datos de costos de la implementación de un sistema agrivoltaico y se evaluó en relación con el beneficio económico y el beneficio de mantener la actividad agrícola. Aunque este tipo de proyectos contribuye a la rentabilidad, la instalación de este sistema puede ser relativamente costosa. El caso de estudio se desarrolla en una superficie de terreno de 2 ha correspondientes a una capacidad agrivoltaica de 1.038 kW, donde el coste es de 1'343.849 euros. Los resultados destacan que, al igual que otras inversiones de capital, la elección de implementar este sistema implica una inversión financiera inicial alta. Cabe destacar que los costos de inversión específicos más altos del sistema son para los módulos fotovoltaicos, la estructura de montaje y la preparación e instalación del sitio. Otros estudios determinaron un costo de instalación de hasta un 60 % más alto para el sistema agrivoltaico en comparación con el sistema fotovoltaico montado en el suelo (Sojib Ahmed *et al.*, 2022).

1.3. Estudios agrivoltaicos en Colombia

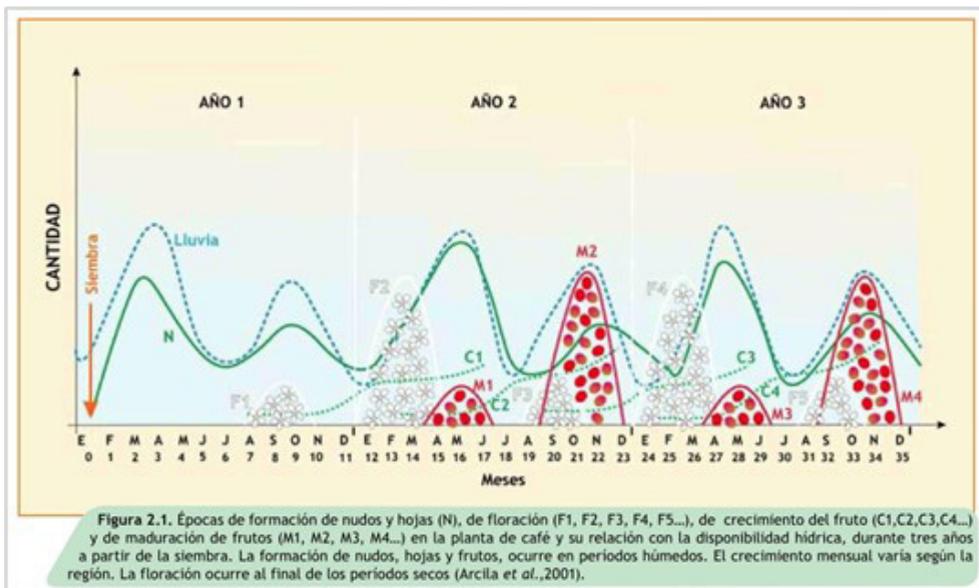
Afortunadamente, existen trabajos que se han enfocado en el estudio de los sistemas agrivoltaicos en Colombia. Cusva García, en su trabajo, presenta un análisis sobre los beneficios de los sistemas agrivoltaicos en Colombia junto con un caso de estudio. El autor sugiere un cálculo para el costo del sistema agrivoltaico, el cual incluye el precio de paneles e inversores, además de un método de Inversión en Bienes de Capital (CAPEX), que para la obra civil es del 27 %, y un sobrecosto al sistema del 30 % debido a la dificultad en la instalación comparado con los sistemas solares tradicionales. Además, menciona la Resolución CREG 030 de 2018, la cual define las reglas para que los usuarios puedan producir y vender energía eléctrica en Colombia. También sugiere un costo de operación y mantenimiento del 5 % de la inversión total para un periodo de 25 años —que es la vida útil estimada de un panel solar— (Cusva García, 2022).

1.4. Cultivo de café como posible modelo para la incorporación de un sistema agrivoltaico en Colombia

Según Arcila Pulgarín (2007), el cultivo de café depende de la cantidad y la calidad de su crecimiento para tener rendimientos en producción eficientes. Bajo un buen manejo, el cafeto es un arbusto que en condiciones comerciales alcanza hasta 20-25 años, tiempo de vida compatible con la durabilidad de los sistemas fotovoltaicos.

En la figura 3 se muestra el desarrollo de una planta de café, cómo se observa que la mayor maduración o producción de frutos se presenta entre los meses de septiembre y diciembre (denominada primera cosecha), mientras que, entre los meses de abril y julio, se presenta la segunda cosecha, pero con menor producción. Esta diferencia entre las cosechas se debe, según Arcila, a la disponibilidad de agua, de nutrientes y de energía, ya que el crecimiento es más activo cuando se presenta un óptimo suministro de estos (Arcila Pulgarín, 2007). Sin embargo, el exceso de radiación puede llevar a periodos secos produciendo baja humedad en el suelo, lo que afectaría de forma negativa la productividad (Alarcó López, 2011).

Figura 3. Efecto de las sombras en el crecimiento de un cultivo



Fuente: tomado de (Arcila Pulgarín et al., 2001, como se citó en Arcila Pulgarín, 2007, p. 2).

1.5. Políticas e incentivos para la generación de energías renovables en Colombia

Regionalmente, los proyectos fotovoltaicos se pueden considerar como proyectos privilegiados en el departamento del Huila, favoreciendo la inclusión de estas tecnologías a través del Acuerdo 017 del 2021: "Por medio del cual se declara a Neiva ciudad del sol" (2021), donde se busca promover el desarrollo y uso de fuentes renovables para la generación de energía eléctrica, dando beneficios tributarios a las personas naturales y jurídicas que realicen proyectos de este tipo, quienes obtendrán un 10 % de descuento en el valor del impuesto de industria y comercio (ICA).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente estudio, primero se realizó una revisión documental, donde se determinaron los parámetros técnicos y procedimentales aplicados en las diferentes etapas del desarrollo de un sistema agrivoltaico y el análisis de viabilidad económica. Para la obtención de los documentos, se utilizó la base de datos en la que se encuentra suscrita la Universidad Surcolombiana como Scopus. Se identificaron palabras clave o términos alternativos como "agr*voltaic" o "agrophotovoltaic", y farm* o agricultur*, con la finalidad de no perder información por la sinonimia del lenguaje. Solo utilizamos el formato "artículo" con el objetivo de evitar la duplicación de información. El periodo de estudio se inicia en el año 2011, ya que es cuando se encuentra el primer artículo. La búsqueda se desarrolló en 2022 y la muestra final analizada estuvo compuesta por 79 artículos.

Adicionalmente, a modo de ejemplo, se realizaron las simulaciones del sistema fotovoltaico utilizando el *software* System Advisor Model (SAM) versión 2021.12.02 del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de los Estados Unidos con licencia de código abierto. Este simulador permite realizar el cálculo de la energía producida por el sistema fotovoltaico en un área de estudio específica. El uso del software permite tener una aproximación real del sistema, ya que cuenta con una base de datos sobre la radiación solar a lo largo del año de estudio. Adicionalmente, se usó el software Revit 2022 con licencia educativa de Autodesk para la simulación tridimensional del sistema agrivoltaico y la proyección de las sombras a lo largo del día sobre los cultivos. Finalmente, para determinar la rentabilidad del sistema agrivoltaico, se calculó el VAR, ROI y TIR, por medio de la herramienta Excel.

Para definir la población y región de estudio a la cual se analizó la implementación de un sistema agrivoltaico, se identificó la región con las condiciones climáticas pertinentes para la tecnología con mayor radiación solar. Se identificó que el cultivo seleccionado tenga una mayor producción en la región y pueda beneficiarse con la tecnología —según la revisión del estado del arte—. Para el caso de estudio,

se seleccionó al municipio de San José de Isnos ubicado en el departamento del Huila, ya que este es el departamento con mayor producción de café del país con aproximadamente el 19 % de la producción total (Gobernación del Huila, 2021). Adicionalmente, el municipio de Isnos cuenta con buenos parámetros geográficos para la generación de energía solar (radiación anual media de 4kWh/m² por día) y su producción cafetera es a dos cosechas (Comité Cafetero del Huila, 2022).

2.1. Condiciones de estudio

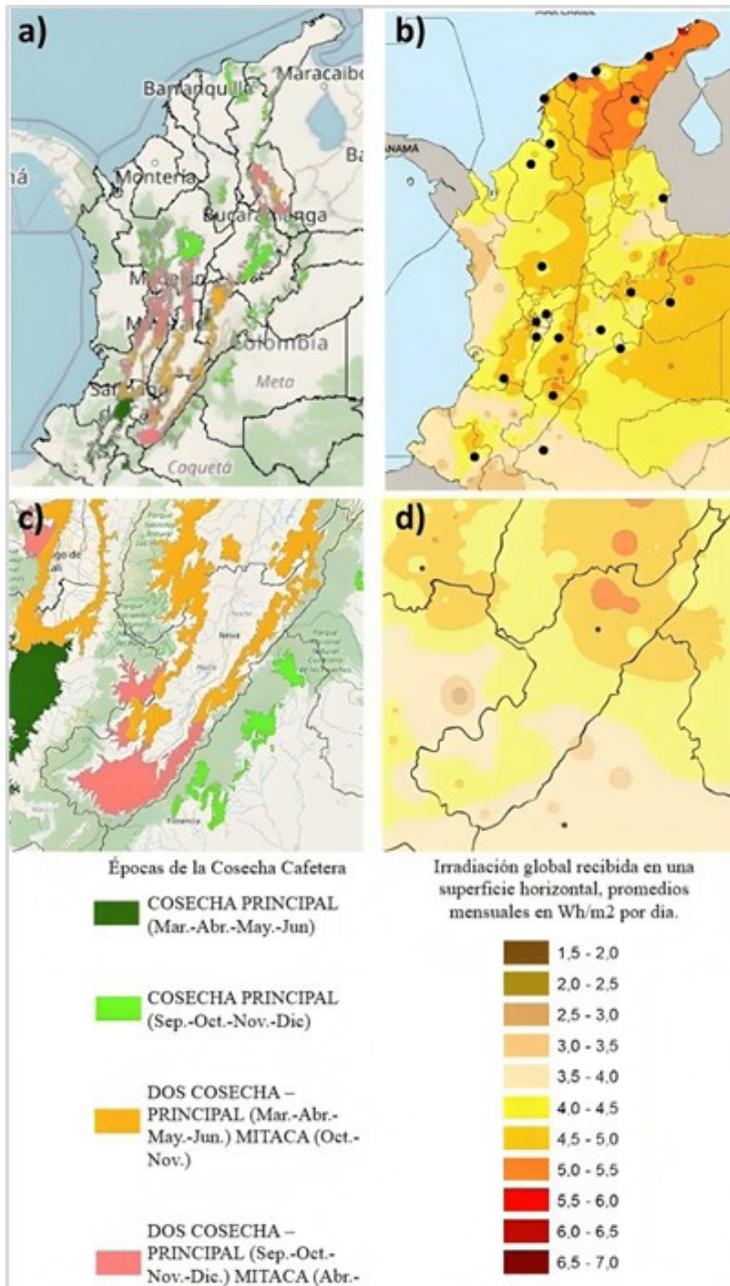
Como se muestra en la figura 4, las fincas cafeteras en Colombia se encuentran distribuidas en la zona central sobre las cordilleras, y en cada zona se realizan las cosechas en diferentes temporadas. Las zonas verdes (claro y oscuro) representan fincas con una única cosecha, mientras que las rosadas y naranjas cultivos a dos cosechas. Para las zonas rosadas la cosecha principal se realiza en el periodo de septiembre a diciembre y la secundaria entre abril y junio, mientras que en las zonas naranjas el proceso es inverso. Ya que el sistema fotovoltaico funciona a lo largo del año, se decidió estudiar las zonas cafeteras de dos cosechas, las cuales se encuentran principalmente en los departamentos de Tolima y Huila, siendo el departamento del Huila el mayor productor y área cosechada en Colombia, según la evaluación agropecuaria municipal (EVA-2022) (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, 2022). Adicionalmente, el departamento del Huila cuenta con buena incidencia solar, como se aprecia en las figuras 4.b y 4.d. Por lo tanto, como caso de estudio se seleccionó una zona aleatoria en el municipio de San José de Isnos en el departamento del Huila, Colombia, el cual cumple con las condiciones óptimas como son radiación solar media de 3,5-4,5 kWh*m² y cultivos de café a dos cosechas.

Tabla 1. Cálculo de la inversión inicial de un sistema Agrivoltaico para 20 paneles en Colombia

Descripción	Cant.	Precio unitario	Precio total
Panel Solar 550 W	20	\$ 1.046.000	\$ 20.920.000
Inversor DC-AC con conexión a la red	1	\$ 3.397.000	\$ 3.397.000
capex (Obra civil, estructura, cables, otros implementos)			\$ 10.250.384
Sobre costo Agrivoltaico (30 %)			\$ 11.389.315
		Total	\$ 45.956.699

Fuente: elaboración propia, 2022.

Figura 4. Mapas de las zonas con cultivo de café y radiación solar en Colombia (a,b) y el Huila (c,d), respectivamente.



Fuente: para (a y c) (Comité Cafetero del Huila, 2022), y para (b y d) (IDEAM, 2022).

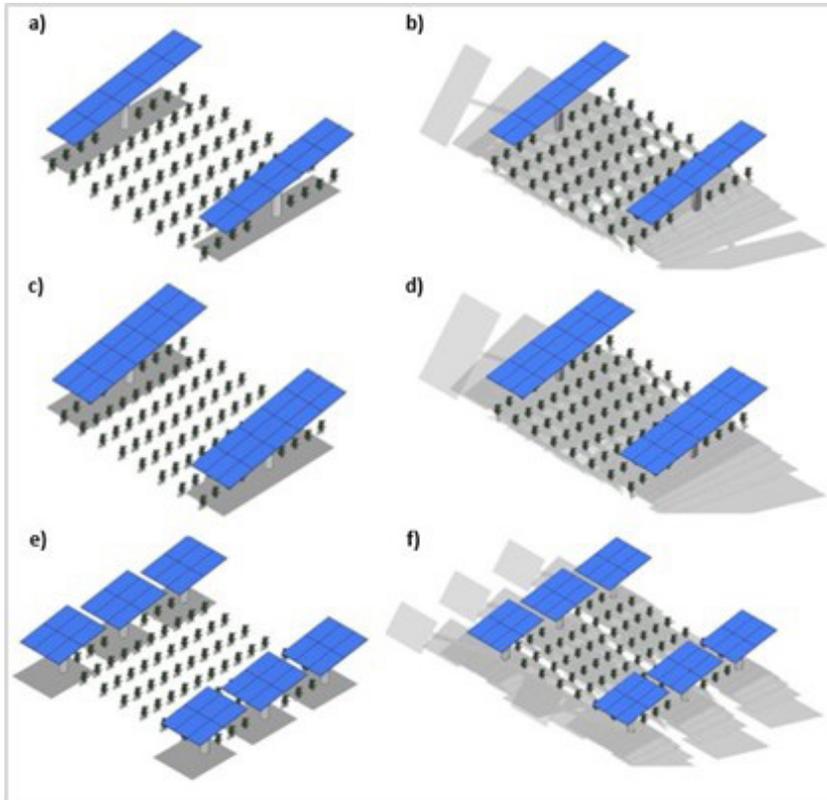
El sistema agrivoltaico se realizó en una zona aleatoria con latitud 2 y longitud -73, las cuales fueron ingresadas en el software SAM para determinar la radiación solar a lo largo del año. El software toma dichos valores de la base de datos National Solar Radiation Database (NSRDB) del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL, 2022). Se asumió un área de cultivo de 14x12 m con una densidad de 1 planta cada 2 m², según lo establecido en el manual de buenas prácticas para la cosecha de café bajo sombra (FHA, 2004). Además, se asumió que el sistema agrivoltaico solamente sería dedicado a la venta de energía, ya que no se cuenta con un perfil de consumo energético.

Para el estudio del sistema agrivoltaico, se realizaron tres configuraciones diferentes con 20, 30 y 36 paneles (AV1, AV2, y AV3, respectivamente), y en cada configuración se realizó el estudio con un inversor central o un inversor por sección, dando por tanto un total de 6 sistemas agrivoltaicos posibles. Finalmente, para el cálculo de la inversión inicial de cada sistema agrivoltaico se utilizó como modelo el trabajo de Cusva García (2022). En la tabla 1 se indica el CAPEX, que para este caso es del 27 % sobre el valor de los paneles y el inversor, y un sobrecosto del 30 % debido a las dificultades que puede presentar una instalación fotovoltaica sobre los cultivos; además se tomó como costo de operación el 5 % de la inversión inicial. Los precios por panel e inversor se tomaron con base en un proveedor aleatorio Solartex 2022. Para el cálculo del tiempo de retorno, se tomó una degradación del panel fotovoltaico del 0,5 % anual, una inflación del 8 %, y un precio de bolsa de la energía en Colombia igual a 230 COP/kWh (promedio anual para el año 2021) (XM, 2022).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de determinar la viabilidad económica para la futura implementación de sistemas agrivoltaicos en Colombia a fin de potenciar la producción de cultivos como el café y mejorar la productividad por medio de la inclusión tecnológica, se plantearon seis escenarios de acuerdo con los parámetros detallados en la metodología. La figura 5 muestra la simulación de las tres configuraciones estudiadas en este trabajo con a) AV1, c) AV2 y e) AV3, correspondientes a 20, 30 y 36 paneles respectivamente. El software Revit simula la proyección de sombras basado en el movimiento del sol a lo largo del día; en este caso, en la primera columna de la figura 5, se observa la sombra proyectada al medio día, mientras que en la columna de la derecha (figuras b, d y f) se muestra el movimiento de las diferentes sombras y se puede percibir que para el caso del AV1 la densidad de sombras es menor, puesto que hay menos zonas oscuras, lo que indica que no hubo tanta superposición de sombras sobre una misma planta, algo que podría ser beneficioso para el desarrollo del cultivo.

Figura 5. Simulación en Revit de las tres configuraciones agrivoltaicas a) AV1 para 20, c) AV2 para 30 y e) AV3 para 36 paneles



Fuente: elaboración propia, 2022.

Por otro lado, en el caso del AV3, al existir una separación entre la estructura de los paneles, algunas plantas podrán permanecer en contacto directo con la radiación, lo que podría afectar su crecimiento en comparación con aquellas que sí se encuentran sombreadas. No obstante, en términos generales, los tres diseños cumplirían como elementos de sombra permanente en el cultivo ayudando a reducir, por ejemplo, las horas de radiación solar directa en las plantas, la temperatura del suelo y la tasa de evaporación del agua. En cuanto a la afectación directa del cultivo por la integración de los sistemas agrivoltaicos, se debe tener en cuenta que, para el área de estudio, de un total de 80 plantas para el caso del diseño AV1 y AV2, se deberán retirar solo 4, equivalente al 5 % del cultivo, mientras que para el diseño AV3 se deberían retirar 8 (equivalente al 10 %).

Una vez definidas las tres configuraciones, se plantearon 2 diseños para cada una: con inversor central o con inversores por grupo de paneles. De esta manera se simularon 6 casos como se indica en la tabla 2. La potencia pico se calculó al multiplicar el número total de paneles por la potencia nominal de cada panel (550W). Para la energía generada por año se tomó un valor medio de radiación en el municipio de Isnos de (4kWh/día) y una eficiencia del sistema fotovoltaico (teniendo en cuenta las pérdidas del inversor, cable, etc.) de 90 %. Adicionalmente, se presenta el valor de la inversión inicial y su respectivo precio por vatio instalado, que ronda en el mejor de los casos a 1 dólar por vatio, valor recomendado en el ámbito internacional.

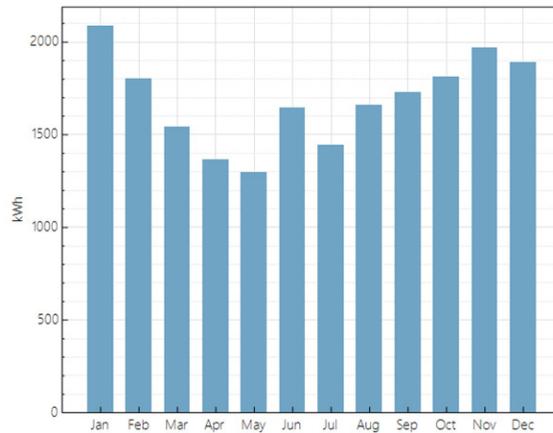
TABLA 2. Matriz de comparación de los diferentes casos estudiados

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Configuración	AV1	AV1	AV2	AV2	AV3	AV4
Plantas removidas	4	4	4	4	8	8
Paneles instalados	20	20	30	30	36	36
Inversores	1	2	1	2	6	1
Potencia inversor (kW)	6	10	10	20	3,3	20
Área ocupada por los paneles (m ²)	54,0	54,0	81,0	81,0	97,2	97,2
Potencia pico (kW)	11,0	11,0	16,5	16,5	19,8	19,8
Energía generada por año (kWh)	11.726,2	11.726,2	17.589,4	17.589,4	21.107,2	21.107,2
Inversión inicial (millones de COP)	\$45.9	\$53.9	\$89.2	\$76.2	\$88.4	\$87.5
Precio por Vatio (COP)	\$4.486,7	\$4.903,7	\$5.409,4	\$4.624,2	\$4.466,1	\$4.418,9

Fuente: elaboración propia, 2022.

Adicionalmente, se tuvo en consideración que la radiación anual percibida no es constante y varía de acuerdo con el mes. La figura 6 muestra el perfil de energía generada por mes del sistema agrivoltaico obtenidos de SAM, presentando picos de generación que coinciden con el periodo de la primera cosecha, mientras que los mínimos coinciden con la segunda. Sin embargo, vale aclarar que aún en su mínima generación el sistema fotovoltaico siempre funciona.

Figura 6. Perfil anual de generación de energía por el sistema agrivoltaico



Fuente: elaboración propia, 2022.

La tabla 3 recoge los principales resultados del estudio. Se presenta el valor de inversión inicial, y las ganancias acumuladas y netas para una vida útil de 25 años. Es evidente que un correcto diseño fotovoltaico puede reducir la inversión inicial y por ende presentar un tiempo de retorno menor, como cuando se comparan los casos 1 y 2, los cuales producen la misma energía y por ende las mismas ganancias, pero en el caso 2 al contar con un inversor centralizado, la inversión inicial y el costo de operación son más altos (cerca de un 9%) lo que conlleva a tener un tiempo de retorno más lento. Sin embargo, este comportamiento no se vio para los casos 3-4 y 5-6, donde el diseño de un inversor centralizado presenta una mejor rentabilidad, puesto que la inversión inicial es menor en 15 y 6% respectivamente.

Tabla 3. Proyecciones económicas y cálculos de rentabilidad de los sistemas agrivoltaicos propuestos. Precios en millones de COP

Caso	Inversión	Ganancia acumulada	Costo de operación	Ganancia neta	Tiempo de retorno	roi	tir	van
1	\$ 45.9	\$ 182.6	-\$ 7.2	\$ 175.4	13	226 %	9 %	\$ 33.5
2	\$ 53.9	\$ 182.6	-\$ 7.9	\$ 174.7	14	197 %	8 %	\$ 28.6
3	\$ 89.3	\$ 273.9	-\$ 13.1	\$ 260.8	14	168 %	7 %	\$ 33.9
4	\$ 76.3	\$ 273.9	-\$ 11.2	\$ 262.7	13	216 %	9 %	\$ 47.8
5	\$ 92.8	\$ 328.7	-\$ 13.6	\$ 315.1	13	211 %	8 %	\$ 55.9
6	\$ 87.5	\$ 328.7	-\$ 12.8	\$ 315.9	13	231 %	9 %	\$ 61.7

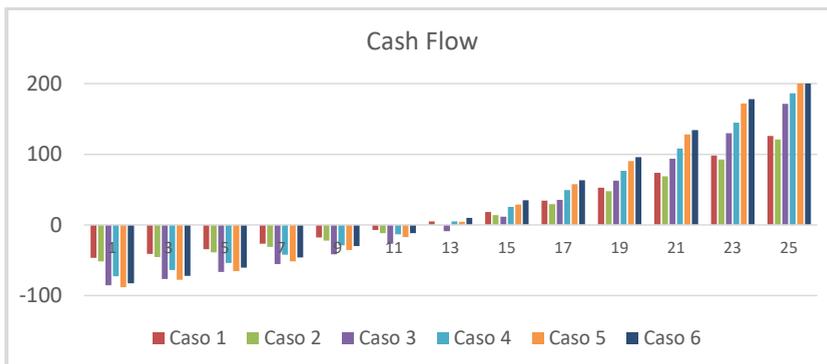
Fuente: elaboración propia, 2022.

NOTA: Retorno de la inversión (roi), Tasa interna de retorno (tir), Valor actual neto (van).

Se observa en la tabla 3 el impacto positivo, pues los recursos invertidos en la estructura del sistema agrivoltaico se rentabilizaron hasta en un 231 %, siendo el ROI del caso 6 el más alto de entre los analizados. El VAN de todos los sistemas diseñados es altamente positivo y en el orden de magnitud de la inversión inicial de los casos analizados son económicamente viables, a una tasa de descuento del 5 %, según la recomendación de la Comisión Europea para la evaluación de proyectos (EU, 2014), permitiendo generar ganancias por encima de la tasa de descuento y proporcionar el rendimiento requerido al inversionista de hasta 61 millones para el caso 6. La TIR está alrededor del 7 %, siendo la más baja para el caso 3 hasta una TIR de 9 % para los sistemas agrivoltaicos de los casos 1, 4 y 6, expresando que el proyecto retribuye la inversión utilizada, una vez recuperados los costos de inversión y operación, según las tasas obtenidas respectivamente. Todos los sistemas fotovoltaicos representan, por lo tanto, una inversión segura y —a manera de sugerencia— bajo el perfil de un agricultor, el caso 1 es idóneo para adoptar este sistema con una inversión de \$45.9 millones y unos indicadores rentables como la TIR y ROI de 9 % y 226 %, respectivamente.

Los casos 1 y 6 son los principales candidatos para un sistema agrivoltaico, siguiendo las consideraciones propuestas en este ejemplo práctico. Es importante considerar que a pesar de contar con un ROI similar, el caso 6 necesita de una inversión 77 % mayor que la del caso 1, siendo de difícil acceso para un agricultor de pequeña escala. La figura 7 muestra el *Cash Flow* para cada uno de los casos estudiados para un periodo de 25 años de funcionamiento. Se observa que la inversión llega a su punto de equilibrio a partir del año 13, salvo en los casos 2 y 3, en los que tarda un año más, siendo el caso 3 el peor, suponiendo su alto valor de inversión inicial.

Figura 7. Gráfico de retorno de cada uno de los sistemas diseñados



Fuente: elaboración propia, 2022.

4. CONCLUSIONES

En el documento se presentó el análisis para determinar la viabilidad económica de los sistemas agrivoltaicos en el municipio de San José de Isnos, en el departamento del Huila. Inicialmente se identificó el estado del arte de los sistemas agrivoltaicos, para determinar características de las zonas y cultivos en Colombia con alto potencial para la implementación de esta tecnología y así poder realizar el diseño del sistema agrivoltaico teniendo en cuenta la estructura y la sombra que podría recibir el cultivo. Sin embargo, para Colombia la literatura presenta una gran aproximación e iniciativa la implementación de sistemas agrivoltaicos, pero aún se encuentra en una etapa temprana, precisamente por la falta de proyectos piloto, las restricciones al crédito, dado que variables como los recursos financieros disponibles por el agricultor son limitados y la aceptación y conocimiento de la tecnología por parte de la comunidad es escasa.

Un sistema agrivoltaico es un enfoque estratégico e innovador para combinar la energía renovable con la producción agrícola. La tecnología trae beneficios al cultivo de café bajo sombra en cuanto al control de procesos del cafetal, como el manejo de las condiciones ambientales y agronómicas, el control de malezas y la mejor calidad del grano. La implementación del sistema agrivoltaico podría aumentar los ingresos económicos de los productores agrícolas. Así, es también una alternativa sostenible con el medio ambiente, al reducir emisiones de gases de efecto invernadero y generación de energía limpia.

Este sistema implica una inversión financiera inicial alta y cabe destacar que los costos de inversión específicos más altos del sistema es para módulos fotovoltaicos, estructura de montaje y preparación e instalación del sitio. En los seis diseños propuestos para el sistema agrivoltaico, los resultados de la rentabilidad son positivos y dicho sistema parece ser una opción apropiada para suministrar alimentos y energía. Se recomienda el caso 1, incorporando este diseño a un cultivo de café ya existente. Adoptando el primer caso, se obtendrá una rentabilidad del 9 % que, si bien es una de las más altas dentro de los diseños planteados, en el mercado de fotovoltaicos se considera una rentabilidad moderada y una estimación de alrededor de 11.726,2 kWh/año, donde esta energía puede ser usada para autoabastecimiento y considerarse un ahorro mayor frente a la rentabilidad esperada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen, durante la realización de esta investigación, la asesoría brindada por el profesor Sergio Alexis Castro Hermosa, PhD in Electronic Engineering, así como el acompañamiento y aporte de los compañeros del semillero KAIROS del grupo de investigación CREA de la Universidad Surcolombiana.

REFERENCIAS

- Agostini, A., Colauzzi, M., y Amaducci, S. (2021). Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Applied Energy*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116102>
- Alarcó López, A. (2011). *Modelo de gestión productiva para el cultivo de café (Coffea Arabica L.) en el sur de Ecuador*. <https://oa.upm.es/9985/>
- Amaducci, S., Yin, X., y Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Arcila Pulgarín, J. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/720/3/2.%20Crecimiento%20y%20desarrollo%20planta%20de%20caf%C3%A9.pdf>
- Bote, A. D., y Struik, P. C. (2011). Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia. *Journal of Horticulture and Forestry*, 3(11), 336–341. <https://edepot.wur.nl/192807>
- Comité Cafetero del Huila. (2022, February 11). *Mapa Cosecha Cafetera*. <https://huila.federaciondecafeteros.org/cosecha-cafetera/>
- Consejo de Neiva. (2021, 1 de septiembre). Acuerdo No 017 de 2021. Por Medio Del Cual Se Declara a Neiva Ciudad Del Sol, Se Establece El Uso de Fuentes No Convencionales de Energía - Fnce - En El Municipio de Neiva y Se Dictan Otras Disposiciones. <https://sunnyapp.com/wp-content/uploads/2022/09/ACUERDO-017-DEL-23-08-2021.pdf>
- Cusva García, A. C. (2022). *Análisis para determinar la viabilidad y potencialidad de sistemas agrofotovoltaicos en zonas agrícolas de Colombia*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/cdc77f59-e063-47f6-a708-bcc515d75d84/content>
- Dolezal, A. G., Torres, J., y O'Neal, M. E. (2021). Can Solar Energy Fuel Pollinator Conservation? In *Environmental Entomology*, 50 (Issue 4), 757–761). Entomological Society of America. <https://doi.org/10.1093/ee/nvab041>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., y Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Elamri, Y., Cheviron, B., López, J. M., Dejean, C., y Belaud, G. (2018). Water budget and crop modeling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>
- EU. (2014). *Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects for Cohesion Policy 2014-2020*. https://ec.europa.eu/regional_policy/en/information/publications/guides/2014/guide-to-cost-benefit-analysis-of-investment-projects-for-cohesion-policy-2014-2020
- Feuerbacher, A., Laub, M., Högy, P., Lippert, C., Pataczek, L., Schindele, S., Wieck, C., y Zikeli, S. (2021). An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics. *Agricultural Systems*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103193>

- FHA. (2004). *Producción de café con sombra de maderables*. http://www.fhia.org.hn/descargas/Programa_de_Cacao_y_Agroforesteria/guia_produccion_%20cafe_con_sombra_de_maderables.pdf
- Gobernación del Huila. (2021, July 25). Caficultura huilense sigue creciendo. <https://www.huila.gov.co/publicaciones/10606/caficultura-huilense-sigue-creciendo/#:~:text=Durante%20el%202020%20el%20Huila,productor%20del%20grano%20en%20Colombia.>
- Gonocruz, R. A., Nakamura, R., Yoshino, K., Homma, M., Doi, T., Yoshida, Y., y Tani, A. (2021). Analysis of the rice yield under an agrivoltaic system: A case study in Japan. *Environments - MDPI*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/environments8070065>
- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A. P., Moldenke, A. R., DeBano, S. J., Best, L. R., y Higgins, C. W. (2021). Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>
- Hassanien, R. H. E., Li, M., y Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, pp. 989–1001. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
- IDEAM. (2022). *Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia*. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Leon, A., y Ishihara, K. N. (2018). Assessment of new functional units for agrivoltaic systems. *Journal of Environmental Management*, 226, 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.013>
- NREL. (2022). *NSRDB: Base de datos nacional de radiación solar*. <https://nsrdb.nrel.gov/>
- Oliveros-Tascón, C. E., y Sanz-Uribe, J. R. (2011). Ingeniería y café en Colombia Engineering and Coffee in Colombia. *Revista de Ingeniería*, 1(33), 99-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.16924/revinge.33.10>
- Poonia, S., Jat, N. K., Santra, P., Singh, A. K., Jain, D., y Meena, H. M. (2022). Techno-economic evaluation of different agri-voltaic designs for the hot arid ecosystem India. *Renewable Energy*, 184, 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.074>
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., y Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Sojib Ahmed, M., Rezwan Khan, M., Haque, A., y Ryyan Khan, M. (2022). Agrivoltaics analysis in a techno-economic framework: Understanding why agrivoltaics on rice will always be profitable. *Applied Energy*, 323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119560>
- Taki, M., Rohani, A., y Rahmati-Joneidabad, M. (2018). Solar thermal simulation and applications in greenhouse. In *Information Processing in Agriculture*, 5 (Issue 1), 83–113. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.10.003>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2021). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales-EVA*. EVA Departamental 2019-2021. <https://experience.arcgis.com/experience/17859d5712b046fa6b0df5781e0b560/page/EVAs/?views=EVA-Departamental--2019---2021>

- Villarreyrna, A., y Rogelio, A. (2016). Efecto de los árboles de sombra sobre el rendimiento de los cafetos, basado en perfiles de daño. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27058.61124>
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., y Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(59). <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
- XM. (2022). *Precio de bolsa y escasez*. <https://www.xm.com.co/transacciones/cargo-por-confiabilidad/precio-de-bolsa-y-escasez>
- Zheng, J., Meng, S., Zhang, X., Zhao, H., Ning, X., Chen, F., Omer, A. A. A., Ingenhoff, J., y Liu, W. (2021). Increasing the comprehensive economic benefits of farmland with even-lighting agrivoltaic systems. *PLoS ONE*, 16(15 July). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254482>
- Zografidou, E., Petridis, K., Petridis, N. E., y Arabatzis, G. (2017). A financial approach to renewable energy production in Greece using goal programming. *Renewable Energy*, 108, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.044>