



Artículo Original

Estimación del potencial de la agrovoltaica en Honduras a partir de modelos y datos geospaciales

Estimation of the potential of agrivoltaics in Honduras utilizing models and geospatial data

Ricardo Roussel¹ , Víctor Samperi , Cristian Andrés Cruz Torres 

Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana, UNITEC, Tegucigalpa, Honduras

Historia del artículo:

Recibido: 13 agosto 2022

Revisado: 5 septiembre 2022

Aceptado: 26 noviembre 2022

Publicado: 8 diciembre 2022

Palabras clave

Agricultura

Agrovoltaica

Energía fotovoltaica

Energía renovable

Honduras

Keywords

Agriculture

Agrovoltaics

Photovoltaic energy

Renewable energy

Honduras

RESUMEN. Introducción. El incremento de la demanda de energía limpia y sostenible, la cual se estima que su principal oferta provendrá de la energía solar fotovoltaica, tiene el potencial de incrementar la competencia por terrenos entre la energía y la producción de alimentos. Honduras tiene un índice de electrificación bajo y padece de inseguridad alimentaria en todo su territorio, especialmente en los departamentos del corredor seco. Para reducir la futura competencia entre la generación de electricidad y el crecimiento de cultivos, y mejorar la resiliencia de la población hondureña ante los efectos del cambio climático; se propone la agrovoltaica como una solución. **Métodos.** Se utilizaron modelos de simulación de cultivos y de módulos fotovoltaicos para calcular el LER (Razón Equivalente de la Tierra). **Resultados.** Se determinó un LER de 124.92% para una instalación agrovoltaica de 1 hectárea, utilizando papas como el cultivo, en San Andrés, Lempira. Adicionalmente, el LER para un cultivo C3 genérico, en base a un modelo de fotosíntesis, se calculó para toda la extensión territorial de Honduras, lo cual resultó en un rango entre 135.45% hasta 149.34%. **Conclusión.** Los modelos indican que el territorio hondureño posiblemente se presta para un alto aprovechamiento de la agrovoltaica.

ABSTRACT. Introduction. The increasing demand for clean and sustainable electrical energy, which is likely to be supplied by photovoltaic energy, has the potential to accelerate the competition for land between energy and food production. Honduras has a low access to electricity of 85.22% and suffers from food insecurity throughout its territory, especially in the departments of the Dry Corridor. To reduce future competition between electricity generation and crop growth and improve the resilience of the Honduran population against the effects of climate change, agrivoltaics is proposed as a solution. The study aim was to calculate and model the agrivoltaic potential in Honduras. **Methods.** Crop and photovoltaic simulation models were used to calculate the Land Equivalent Ratio. **Results.** A LER of 124.92% was calculated for an agrivoltaic system of 1 hectare, using potatoes as the crop, in San Andrés, Lempira. Additionally, the LER for a generic C3 crop, based on a photosynthesis model, was calculated for the entirety of Honduras, which resulted in a range between 135.45% and 149.34%. **Conclusion.** The models indicate that Honduras possibly has a high potential for agrivoltaics.

1. Introducción

El Corredor Seco describe la zona tropical centroamericana donde se han observado periodos prolongados de sequías. El área del Corredor Seco que se encuentra en Honduras padece de inseguridad alimentaria crónica, mientras que el resto del país se encuentra en un estado de inseguridad alimentaria aguda. En gran parte, esto se debe al cambio climático y su efecto de alterar las zonas que son aptas para el crecimiento de cultivos (Integrated Food Security Phase Classification [IPC],

2018). La intermitencia de las lluvias y el alza en temperaturas se puede mitigar implementando sistemas que sean capaces de brindar un mejor ambiente para los cultivos, especialmente los cultivos de la canasta básica. Una de las soluciones que se han empezado a implementar en los últimos años es la agrovoltaica, en la cual se utilizan módulos fotovoltaicos para generar electricidad y brindar sombra a los cultivos. El rubro agrícola está en necesidad de desarrollar soluciones innovadoras que tengan la capacidad de mejorar la calidad de vida de las personas en el estrato rural, cubriendo cada una de las necesidades del nexo agua-energía-alimento.

¹ Autor correspondiente: ricardoroussel@unitec.edu, Universidad Tecnológica Centroamericana, Campus Tegucigalpa

Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5377/innovare.v11i13.15332>

© 2022 Autores. Este es un artículo de acceso abierto publicado por UNITEC bajo la licencia <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

Honduras es un país con un alto potencial fotovoltaico, tiene una irradiación horizontal global diaria entre 4.37 y 6.12 kWh/m² (Global Solar Atlas, 2020). La mayoría de la energía fotovoltaica proviene principalmente de la parte sur del país, donde incide la mayor cantidad de radiación. No obstante, en gran parte del Corredor Seco incide una radiación comparable y el resto del territorio cuenta con suficiente radiación para que instalaciones a pequeña escala sean viables. La matriz energética de Honduras no cuenta con la infraestructura necesaria para asegurar el acceso a un gran porcentaje de la población, evidenciado el índice de cobertura eléctrica de 85.22%, especialmente en zonas rurales (Secretaría de Energía [SEN], 2021). En los últimos años, ha habido iniciativas de implementación de microrredes para poder otorgarle el servicio a las zonas más alejadas (Sistema de la Integración Centroamericana [SICA], 2018). Sin embargo, la electricidad solo es una de las muchas necesidades que la población hondureña no logra suplir.

Las instalaciones agrovoltaicas utilizan un solo terreno para producir comida y energía, teniendo la capacidad de proteger los cultivos ante la reducción de la precipitación y el incremento de la temperatura causadas por el cambio climático. Se han realizado estudios sobre agrovoltaica en Alemania y Chile, en los cuales se ha llegado a aplicar el concepto de manera práctica, obteniendo resultados bajo condiciones reales. En el estudio realizado en Chile se determinó que la agrovoltaica puede ser una opción económicamente viable para agricultores (Jung et al., 2021). Además, en Alemania, se notó un beneficio en el uso de la agrovoltaica, ayudando en la resiliencia de los cultivos en lugares con alta radiación solar y acceso limitado al agua (Trommsdorff et al., 2021). La siguiente investigación tiene como fin determinar el potencial de la agrovoltaica en todo el territorio hondureño con el propósito de ubicar las zonas idóneas para su implementación, utilizando datos meteorológicos y modelos matemáticos. La métrica utilizada para determinar el potencial es la eficiencia con la que se usa un solo terreno en términos del rendimiento de los cultivos y la energía fotovoltaica.

2. Métodos

Esta investigación está basada en la información disponible de instalaciones agrovoltaicas simuladas y reales. Se recopiló datos de diferentes investigaciones y se encontraron los modelos y simulaciones que se utilizaron para determinar el rendimiento teórico de los cultivos y módulos fotovoltaicos utilizando bases de datos geográficas.

Los datos de radiación, elevación y temperatura fueron obtenidos de Solargis. Las mediciones de radiación

utilizadas por Solargis provienen de satélites, representando mayor precisión al estimar niveles de radiación solar histórica, reciente y futura (Solargis, 2022).

El Land Equivalent Ratio (LER) es el indicador utilizado para medir la eficacia de los sistemas agrovoltaicos (Figura 1). Toma la efectividad con la que se usa un mismo espacio de terreno calculando la razón entre la producción de cultivos, sin módulos fotovoltaicos encima y la producción de cultivos en una instalación agrovoltaica. Seguidamente, se suma la razón entre la generación de electricidad por su cuenta y la generación de electricidad en una instalación agrovoltaica. Esta investigación se centró en calcular el LER para todo el territorio geográfico hondureño, encontrando cada término en la ecuación. Se utilizó el modelo de Farquhar, von Caemmerer y Barry modificado por Yin y Struik para determinar el rendimiento de los cultivos. Mientras que el rendimiento fotovoltaico fue calculado utilizando la biblioteca de Python PVLIB (Holmgren et al., 2018).

$$LER [\%] = LER_{\text{Cultivos}} + LER_{\text{PV}} = \frac{FvCB(I \cdot D_{180^\circ, 130^\circ})}{FvCB(I)} + \frac{\text{Rendimiento}_{\text{PV}} - APV_{180^\circ, 130^\circ} \cdot FC}{\text{Rendimiento}_{\text{PV}} - G_{\text{PV}}} \quad (1)$$

Las variables de la ecuación del LER se interpretaron de la siguiente manera: (I) es la irradiación [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] (D) es el porcentaje de irradiación disponible, el rendimiento fotovoltaico [kWh] se calcula utilizando el rendimiento de una planta agrovoltaica variando el azimut a 180° (considerado ideal para sistemas fotovoltaicos) o 130° (considerado ideal para sistemas agrovoltaicos). Adicionalmente, se multiplica con un factor de corrección (FC) basado en la reducción de densidad de los módulos en instalaciones agrovoltaicas. El valor de (FC) es el resultado del promedio de la densidad de módulos (Dupraz et al., 2011), la reducción de área cubierta por los módulos (Jung et al., 2021), y la proporción entre la separación de los módulos fotovoltaicos en sistemas convencionales y agrovoltaicos (Trommsdorff et al., 2021).

2.1. Modelo de fotosíntesis FvCB

Farquhar, von Caemmerer y Barry publicaron un modelo bioquímico para la tasa de fotosíntesis de plantas C3 en 1980 (Yin & Struik, 2009). Yin y Struik realizaron una serie de modificaciones para mejorar el modelo.

$$A^3 + pA^2 + qA + r = 0 \quad (2)$$

Los datos de irradiación [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], elevación [m] y temperatura [$^\circ\text{C}$] fueron introducidos en el modelo FvCB. Los resultados luego fueron utilizados en la ecuación del LER.

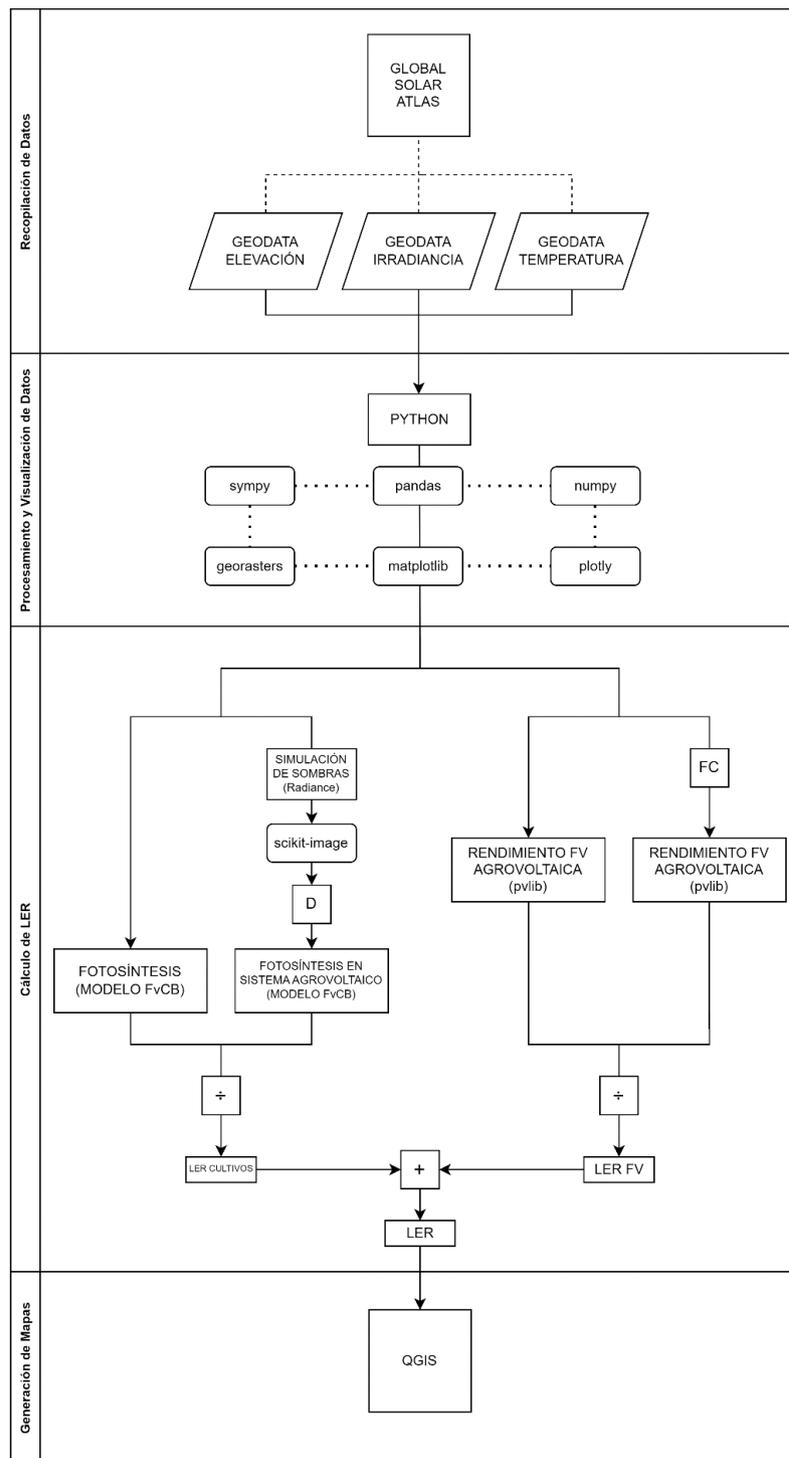


Figura 1. Proceso para el cálculo de LER a lo largo del territorio hondureño.

2.2. Cálculo de irradiancia disponible

El cálculo de la irradiancia disponible se obtuvo simulando módulos fotovoltaicos utilizando la versión de Radiance desarrollada por los científicos de National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Deline & Ayala, 2017).

Se simuló la radiación en los módulos para un año entero. Debido a que la simulación requeriría bastante tiempo para realizar en cada punto geográfico de Honduras, se decidió realizar la simulación en el centroide de Honduras (coordenadas: 14.821, -86.617), el cual fue calculado utilizando QGIS (QGIS, s.f.). La imagen fue analizada utilizando Scikit-image (Scikit-image, s.f.), el cual permitió hacer un conteo de píxeles por su opacidad, siendo los píxeles más oscuros los que menos recibieron radiación y los más claros los que más recibieron radiación.

2.3. Producción de energía fotovoltaica

La producción de energía fotovoltaica anual se calculó en el centroide de los 298 municipios de Honduras. Los puntos afuera de estos se calcularon utilizando la herramienta de interpolación de QGIS, con el método de ponderación inversa a la distancia. Se utilizó la biblioteca de Python PVLIB, la cual permite obtener los datos meteorológicos necesarios para cada punto automáticamente, la aplicación del modelo de eficiencia en relación con la temperatura del módulo y fijar el acimut e inclinación del módulo.

2.4. Aplicación en sitio específico

2.4.1. WOFOST

World Food Studies o WOFOST, es un modelo de simulación para el análisis del crecimiento y producción de cultivos anualmente (de Wit, 2021a). Los valores que describen a los cultivos se obtuvieron de la base de datos incluida con el software.

2.4.2. System Advisor Model

System Advisor Model, o SAM por sus siglas, es un programa gratuito de modelaje técnico y económico que permite desarrollar simulaciones de interés para personas realizando investigaciones o análisis profesionales en varias áreas de la energía (National Renewable Energy Laboratory [NREL], s.f.). Estas áreas incluyen fotovoltaica, almacenamiento de energía, eólica, celdas de

combustible, geotérmica, etc.

3. Resultados

3.1. Cálculo de irradiancia disponible debajo del módulo

Para conocer si el cambio de acimut de la configuración de los paneles tendría un efecto notable en la irradiancia que incide en los cultivos, se realizó una comparación entre 180° y 130°, basado en un análisis realizado en Chile (Jung et al., 2021). Al analizar los píxeles de las imágenes exportadas en blanco y negro, se observó que había mayor incidencia de radiación solar al usar un acimut de 130°. Al promediar los resultados de irradiancia disponible debajo del módulo, se obtuvo 53.25% para el acimut de 180° y 56.13% para el acimut de 130°.

3.2. Producción de energía fotovoltaica

Mediante la biblioteca PVLIB de Python y QGIS, se logró obtener mapas de la generación de energía para ambos casos de acimut, 180° y 130°. Para el acimut de 180°, se observó un rango de 276 a 429kWh y para el acimut de 130° se observó un rango de 278 a 421kWh.

3.3. Mapa de LER

Usando mapas de temperatura, radiación y altitud, se substituyeron los datos para cada punto del mapa en la Ecuación 1 para determinar el componente de cultivos en el LER (Figuras 2 y 3). Para el componente fotovoltaico del LER, se utilizó PVLIB que únicamente necesitaba el ingreso de los datos de altitud, obteniendo los demás datos necesarios de bases de datos en línea.

En el histograma generado para un acimut de 180°, se observó una frecuencia poco uniforme para los valores de LER, teniendo un pico entre 1.385 y 1.395. Luego esta frecuencia disminuyó rápidamente después de 1.42-1.425. Caso opuesto en el histograma generado para un acimut de 130°, en el cual se observó una uniformidad en los rangos de 1.395 a 1.44, disminuyendo rápidamente luego de este último valor. Inmediatamente se observó que bajo un acimut de 130° se poseen mejores valores de LER y una distribución más informe de los valores.



Figura 2. LER Total en Honduras, Acimut=180°.

3.4. Aplicación en sitio específico

3.4.1. Selección de sitio de estudio

Teniendo una radiación favorable, rangos aceptables de fotosíntesis, estando en el corredor seco y siendo el décimo quinto municipio con menor índice de cobertura (SEN, 2021), se escogió San Andrés, Lempira. Usando imágenes satelitales del municipio, se identificó un terreno que permitiría la instalación de un sistema agrovoltaico en las coordenadas (14.2195, -88.5477). Se escogió la papa como cultivo debido a la disponibilidad de los datos.

3.4.2. Análisis de los cultivos

Utilizando WOFOST, se calculó el indicador Total Above Ground Production (TAGP), el cual indica los kilogramos de cultivo por hectárea a lo largo de la vida del cultivo (de Wit, 2021b). El TAGP de la papa con toda la radiación del sitio resultó en 17,633.96 kg ha⁻¹, mientras que con la sombra resultó en 14,129.51 kg/ha-1. Se determinó que el término del LER de los cultivos es del 80.12%.

Además de obtener el TAGP, se obtuvo la Transpiration Rate (TRA). Este indicador permitió conocer indirectamente que tan eficientemente se está utilizando el agua por el cultivo. Se determinó que la TRA de los cultivos bajo la radiación completa del sitio fue de 313.151 m³ ha⁻¹, mientras que bajo sombra resultó en 206.096 m³ ha⁻¹. Al dividir el TAGP entre la TRA, se obtuvo un indicador en kg/m³ el cual nos indicó cuantos kilogramos de papa crecieron por metro cuadro de agua.

3.4.3. Análisis fotovoltaico

3.4.3.1. Simulación en System Advisor Model

Para el cálculo del LER fotovoltaico se utilizó SAM, dimensionando el sistema en 1 hectárea. Primero, se observó el caso con acimut de 180° y separación de módulos de 2.2 metros. En este caso se obtuvo una generación anual de 1,558,381 kWh al llenar la hectárea con módulos Canadian Solar Inc. CS3W-405P. En el segundo caso, se cambió el acimut a 130° y la separación entre módulos a 5 metros. Se obtuvieron como resultados 697,110 kWh, llenando completamente la hectárea con la nueva separación. Al conocer ambos valores, se calculó un LER fotovoltaico de 44.80%. También, se analizó el comportamiento de la generación de energía a lo largo del año con propósitos de investigar excedentes y baterías.

3.4.3.2. Análisis de curva y generación de demanda

Se utilizó los datos horarios promedio del mes de septiembre, el cual se seleccionó como la base del dimensionamiento, ya que es el mes con la generación fotovoltaica más baja de todo el año, se obtuvo la curva de generación de la energía fotovoltaica. Adicionalmente, se utilizó la curva de demanda promedio de un hogar clase media en Colombia (Hernández Hernández & Carrillo Cruz, 2017), debido a que no hay un estudio disponible que caracterice la curva de demanda del sector residencial en Honduras.



Figura 3. LER Total en Honduras, Acimut=130°.

Con el objetivo de obtener los valores que se multiplicarían a las curvas, se analizó el comportamiento diario tanto de la generación como la demanda. Para la generación, se analizaron los perfiles de energía generada por mes obtenidos de SAM. Al encontrar que el mes con la menor producción de energía era septiembre, se realizó la curva escala tomando como referencia el valor máximo de un día promedio de septiembre, siendo este 229.646 kWh. En el caso de la curva de demanda, se trabajó con el consumo mensual por habitante en Honduras (57.83 kWh/hab/mes) (Secretaría de Energía [SEN], 2019). Junto con este valor y la cantidad de habitantes a considerar, se logró calcular un valor de 94.83 kWh máximo al día.

Utilizando las diferentes bibliotecas de análisis de datos de Python se realizó una regresión polinomial de ambas curvas para obtener una función continua. Esto permitió que se pudiese integrar la función para encontrar la energía en cualquier punto en el tiempo, al igual que encontrar la intersección entre ambas curvas. Se utilizó el código de Perkier Energy para obtener dicha regresión (Sá, 2019).

El error de aproximación entre la suma de los valores para la curva de generación real y su regresión resultó en $1.2237e-06$, y $8.203e-11$ para la curva de demanda.

Los puntos en los cuales la demanda y generación se intersecan se obtuvieron, esto ocurriendo a las 6:51 AM y 3:52 PM. El déficit de energía se calculó integrando la curva de demanda desde la hora 0 hasta la hora 6.8569 y desde la hora 15.8669 hasta la hora 23, el cual resultó en 932.384 kWh. El excedente se obtuvo

integrando la curva de generación entre la hora 6.8559 y 15.8669, y restando la integral de la curva de demanda bajo los mismos intervalos, esto resultó en 932.796 kWh. Calculando la diferencia entre el excedente y déficit, se obtuvo un excedente total de 0.412 kWh. Esto significó que se puede alimentar un banco de baterías con la energía solar para que supla la demanda durante las 24 horas. Los picos para la curva de demanda que se observaron entre las horas 0 y 5, junto a las horas 19 y 23, se igualaron a 0 al momento del cálculo del déficit. Estos picos resultaron de la regresión polinomial y no representaron la producción de manera precisa dentro de esos intervalos.

3.4.4. Dimensionamiento y LER del sistema agrovoltaico en San Andrés, Lempira

El análisis de LER de este terreno se pudo realizar con métodos más específicos. Para el dimensionamiento del sistema y proyecciones de generación de energía, se utilizó SAM. Se realizan dos casos, (1) una hectárea que consiste solamente de módulos a 180° de acimut y a una distancia de 2.2 metros; y (2) una hectárea con módulos a 130° de acimut y a una distancia de 5 metros. Luego, para la biomasa de papa generada y la evapotranspiración, se utilizó el Modelo de Simulación de Cultivos WOFOST. Realizando primero una simulación a radiación completa y otra a radiación multiplicada por el factor de sombra. Una vez aplicada la metodología, se obtuvo un LER en el sitio de San Andrés de 124.92%.

4. Discusión

Las zonas centro y occidentales tuvieron los valores de LER más altos. No obstante, es importante considerar que estos valores no necesariamente indicaron que una ubicación es mejor que la otra. El LER mide la eficiencia del uso del terreno en cada sitio, lo cual ilustra en sí que tanto se perdería en el rendimiento de los cultivos y rendimiento fotovoltaico relativo al mismo sitio al implementar un sistema agrovoltaico.

Para determinar las mejores ubicaciones también hay que tomar en consideración la fotosíntesis y la irradiancia por aparte, junto a otros factores como la ubicación de las tierras cultivables (estos datos únicamente se pueden visualizar y no es posible descargarlos fácilmente (Global Croplands, 2015). Las bases de datos hondureñas son difíciles de acceder. Igualmente, el LER calculado en esta investigación describió el término de los cultivos con un modelo para plantas C3 con parámetros promedio (Yin & Struik, 2009). Para incrementar la precisión del modelo, sería necesario utilizar parámetros bioquímicos para los cultivos particulares que se encuentran en las diferentes zonas de Honduras. Sin embargo, estos resultados muestran que la agrovoltaica puede ofrecer un gran beneficio al Corredor Seco, por lo cual se recomienda hacer estudios experimentales en estas zonas.

En la aplicación de los modelos en San Andrés, se observó un LER de 124.92%, el cual se considera favorable, aunque se haya reducido la producción de papas por 3504.45 kg/ha o 19.87%. Esta reducción era esperada, ya que en otro estudio también se observó una reducción en la producción de cultivos (Schindele et al., 2020). Adicionalmente, se observó como favorable tomando en cuenta que se redujo en un 21.75% el uso del agua, debido a la sombra generada por los módulos. Para realizar una interpretación que demuestra el beneficio de la propuesta, se puede considerar dos hectáreas de terreno, una dedicada al uso de agricultura y la otra a la producción de energía fotovoltaica. Si ambas hectáreas se reemplazan por un sistema agrovoltaico, se incrementaría la producción total de papa por 160% y se reduciría por un 10.4% la generación de energía fotovoltaica.

Por último, ya que se tienen pocos datos sobre el sector agropecuario de Honduras, se recomienda realizar censos respecto a la producción de los diferentes cultivos y la ubicación exacta de las tierras, para poder aplicar un modelo que represente de manera más directa la producción de cultivos en unidades de masa.

5. Conclusión

De acuerdo con los resultados, el territorio de Honduras se presta para un alto aprovechamiento de la agrovoltaica. Observando los mapas generados, se puede determinar que los municipios con los promedios de LER más altos se encuentran en la zona suroeste del país,

estando estos en: Ocotepeque, Lempira, Intibucá y La Paz; extendiéndose hacia el centro del país. Este resultado es favorable ya que esta zona coincide con el Corredor Seco, una de las partes del país con mayor inseguridad alimentaria.

En San Andrés Lempira, el sistema agrovoltaico con papas como cultivo obtuvo un LER que indica un mayor aprovechamiento de la tierra. La reducción de radiación debido a la sombra de los módulos redujo la producción de papas. No obstante, la eficiencia del uso del agua del cultivo mejoró. El sistema tiene la capacidad de dar electricidad a 850 habitantes durante 24 horas, asumiendo un consumo de 57.83 kWh/habitante/mes y almacenando el excedente en un banco de baterías.

6. Contribución de los Autores

RR, VS y CC contribuyeron de manera sustancial a la concepción, investigación, análisis, redacción y aprobación final del manuscrito.

7. Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

8. Referencias Bibliográficas

- Deline, C., & Ayala, S. (2017, 17 de diciembre). *Bifacial_Radiance*. [Computer Software]. <https://dx.doi.org/10.11578/dc.20180530.16>
- de Wit, A. (2021a). *WOFOST – World Food Studies*. Wageningen University & Research. <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Research-Institutes/Environmental-Research/Facilities-Tools/Software-models-and-databases/WOFOST.htm>
- de Wit, A. (2021b). *PCSE*. GitHub. <https://github.com/ajwdewit/pcse>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrovoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36, 2725-2732. <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Global Croplands. (2015). *Global croplands data*. <https://www.croplands.org/app/map?lat=14.41872&lng=-85.52856445312501&zoom=8>
- Global Solar Atlas. (2020). *Global photovoltaic power potential by country*. The World Bank. <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>
- Hernández Hernández, K. A., & Carrillo Cruz, J. S. (2017). *Análisis de la curva de demanda eléctrica para usuarios residenciales estrato 4 en la ciudad de Bogotá ante diferentes escenarios de los hábitos de consumo*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5838/HernandezHernandezKellyAlexandra2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Holmgren, W. F., Hansen, C. W., & Mikofski, M. A. (2018). pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(329), 884. <https://dx.doi.org/10.21105/joss.00884>
- Integrated Food Security Phase Classification [IPC]. (2018, 4 de enero). *Honduras: chronic food insecurity situation 2018-2023*.

- <http://www.ipcinfo.org/ipc-country-analysis/details-map/en/c/1143346/?iso3=HND>
- Jung, D., Salmon, A., & Gese, P. (2021). Agrivoltaics for farmers with shadow and electricity demand: results of a prefeasibility study under net billing in central Chile. *AIP Conference Proceedings*, 2361. <https://dx.doi.org/10.1063/5.0054962>
- National Renewable Energy Laboratory [NREL]. (s.f.). *System Advisor Model (SAM)*. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://sam.nrel.gov/>
- QGIS. (s.f.). *QGIS. A free and open source geographic information system*. <https://www.qgis.org/en/site/>
- Sá, D. (2019). *Perkier energy*. GitHub. <https://github.com/perkier/Perkier.Energy>
- Scikit-image. (s.f.). <https://scikit-image.org/docs/stable/overview.html>
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., & Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 1-19. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Secretaría de Energía [SEN]. (2019). *Informe estadístico anual del subsector eléctrico*. Dirección General de Electricidad y Mercados (DGEM). Gobierno de Honduras.
- Secretaría de Energía [SEN]. (2021). *Informe de cobertura y acceso a la electricidad en Honduras*. Gobierno de Honduras. <https://sen.hn/wp-content/uploads/2022/01/INFORME-DE-COBERTURA-Y-ACCESO-A-LA-ELECTRICIDAD-EN-HONDURAS-V-211221.pdf>
- Sistema de la Integración Centroamericana [SICA]. (2018). *El BID invierte 2,55 millones en microrredes fotovoltaicas en Moskitia, Honduras*. https://www.sica.int/noticias/el-bid-invierte-2-55-millones-en-microrredes-fotovoltaicas-en-moskitia-honduras_1_111004.html
- Solargis. (2022). *Methodology - Solar radiation modelling*. <https://solargis.com/docs/methodology/solar-radiation-modeling>
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., & Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- Yin, X., & Struik, P. C. (2009). C3 and C4 photosynthesis models: an overview from the perspective of crop modelling. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(1), 27-38. <https://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2009.07.001>