

Agrovoltaic Systems: A Sustainable Synergy for Optimizing Water Use, Crop Productivity, and Renewable Energy Generation in Characato-Arequipa, Peru (2024)

Edwar Velarde-Allazo, M.Sc.¹ , Ricardo Zegarra-Pacheco, Ing² , Cielo Nuñez-Lazo, Ing.³ ,

^{1,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, evelarde@utp.edu.pe, u1633941@utp.edu.pe, u17106304@utp.edu.pe

Abstract–

Global demographic growth is increasing the demand for food and energy resources, especially in the context of climate change challenges. This scenario has driven the need for sustainable and innovative solutions that allow for balancing human development with ecosystem conservation. Agrovoltaic systems, which combine solar energy production with agricultural activity, emerge as an option to optimize the use of natural resources and land. This research compares the impact of agrovoltaic systems and traditional systems in terms of crop productivity, water consumption, and energy efficiency. The study was conducted in Characato, Arequipa, Peru, using monitoring tools to measure climatic and agricultural variables during the cultivation of lettuce (*Cichorium Endiviaen*). The results show that agrovoltaic systems optimize water efficiency and reduce thermal stress in crops, maintaining agronomic performance similar to traditional systems. The partial shade provided by the solar panels reduced evapotranspiration rates, achieving a water saving of up to 30% compared to conventional methods. In conclusion, agrovoltaic systems emerge as a sustainable strategy that integrates water management, land use optimization, agricultural production, and renewable energy generation, representing an innovative solution to address challenges related to food security, water scarcity, and the energy transition.

Keywords- *Agrovoltaic Systems, Shading, Growth, Yield, Production*

Sistemas Agrovoltaicos: Una Sinergia Sostenible para la Optimización del Uso del Agua, la Productividad de los Cultivos y la Generación de Energía Renovable en Characato-Arequipa, Perú (2024)

*Resumen– El crecimiento demográfico global está incrementando la demanda de recursos alimentarios y energéticos, especialmente en el contexto de los desafíos del cambio climático. Este escenario ha impulsado la necesidad de soluciones sostenibles e innovadoras que permitan equilibrar el desarrollo humano con la conservación de los ecosistemas. Los sistemas agrovoltaicos, que combinan la producción de energía solar con la actividad agrícola, surgen como una opción para optimizar el uso de recursos naturales y del suelo. Esta investigación compara el impacto de los sistemas agrovoltaicos y los tradicionales en términos de productividad de cultivos, consumo de agua y eficiencia energética. El estudio se realizó en Characato, Arequipa, Perú, utilizando herramientas de monitoreo para medir variables climáticas y agrícolas durante el cultivo de lechuga (*Cichorium Endiviaen*). Los resultados muestran que los sistemas agrovoltaicos optimizan la eficiencia hídrica y reducen el estrés térmico en los cultivos, manteniendo un rendimiento agronómico similar al de los sistemas tradicionales. La sombra parcial de los paneles solares disminuyó las tasas de evapotranspiración, logrando un ahorro hídrico de hasta el 30% en comparación con los métodos convencionales. En conclusión, los sistemas agrovoltaicos emergen como una estrategia sostenible que integra la gestión hídrica, la optimización del uso del suelo, la producción agrícola y la generación de energía renovable, representando una solución innovadora para enfrentar los desafíos de la seguridad alimentaria, la escasez de agua y la transición energética.*

Palabras clave-
Sistemas Agrovoltaicos, Sombreado, Crecimiento, rendimiento, Producción

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático, el aumento de la población y la creciente necesidad de diversificar las fuentes energéticas han impulsado un interés significativo en sistemas que combinan la actividad agrícola con la generación de energía renovable. En este marco, los sistemas agrovoltaicos se presentan como una alternativa innovadora que permite integrar cultivos agrícolas con paneles solares, logrando un uso más eficiente del suelo y promoviendo la sostenibilidad ambiental [1]. Estos sistemas consisten en la instalación de paneles fotovoltaicos a una altura adecuada para que los cultivos puedan desarrollarse bajo ellos. Esta configuración no solo permite producir energía limpia, sino que también genera cambios en las condiciones micro climáticas, como la regulación de la temperatura, la humedad y la cantidad de luz, elementos que tienen un impacto directo en el rendimiento de los cultivos [2].

Por otro lado, los sistemas agrícolas convencionales presentan una mayor vulnerabilidad a eventos climáticos extremos, lo que puede comprometer su estabilidad productiva y eficiencia a largo plazo

Investigaciones han evaluado la efectividad de los sistemas agrovoltaicos en comparación con los métodos convencionales [3] demostraron que ciertos cultivos, como la lechuga y el tomate, presentaron un mejor desempeño en condiciones de sombra parcial proporcionadas por los paneles solares. Además, estos sistemas favorecen la conservación del recurso hídrico al minimizar la evaporación del suelo y mitigar el estrés hídrico en las plantas, especialmente en regiones áridas como el sur del Perú, donde las altas temperaturas aumentan la demanda de agua. Esta investigación tiene como finalidad evaluar y comparar el impacto de los sistemas agrovoltaicos frente a los métodos tradicionales en términos de productividad agrícola, consumo de agua. El análisis se llevará a cabo con base en datos experimentales recolectados en un área de estudio ubicada en Characato, Arequipa-Perú, utilizando herramientas tecnológicas para monitorear variables climáticas y agrícolas. A través de este estudio, se busca generar información relevante sobre los beneficios y limitaciones de los sistemas agrovoltaicos en contextos locales, con el propósito de aportar evidencia científica que pueda guiar el desarrollo de estrategias agrícolas más sostenibles

II. MATERIALES Y METODOS

A. Sistema Agrovoltaico sobre pilotes

Los sistemas agrovoltaico de pilotes está diseñado con paneles solares elevados sobre los cultivos, permitiendo la generación de energía y productividad agrícola, así como facilidad de configuración.

Los pilotes se encuentran a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo. Se instalaron un total de 9 paneles solares, cada uno con dimensiones de 25 x 35 cm, dispuestos en grupos de tres, con una inclinación de 25°. La separación entre cada fila de paneles es de 50 cm. Como muestra la fig 1.

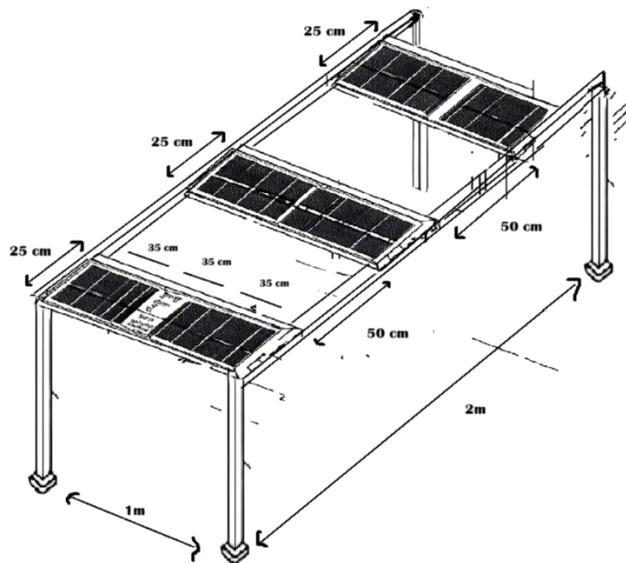


Fig. 1 Sistemas Agrovoltaico de Pilotes

B. Preparación de Suelo

Para garantizar un suelo adecuado para el cultivo de lechugas, se realizó un proceso de preparación enfocado en mejorar su estructura y fertilidad. En primer lugar, se delimitó y limpió el área de cultivo, eliminando malas hierbas, piedras y residuos para crear un entorno uniforme y libre de obstáculos [6]. Se incorporó compost orgánico de alta calidad, en una proporción de 1 parte de compost por 2 partes de tierra, mediante un proceso de mezcla manual utilizando herramientas agrícolas como azadas y cultivadores. La mezcla se realizó de manera homogénea a una profundidad aproximada de 20-30 cm. Este procedimiento optimizó la aireación del suelo, incrementó su capacidad de retención hídrica y enriqueció su contenido de materia orgánica, favoreciendo la estructura y fertilidad del mismo [12].

Una vez realizada la mezcla, se procedió al riego del área preparada, lo que favoreció la activación biológica del compost y facilitó la liberación y asimilación de nutrientes en el suelo. Finalmente, se permitió un período de reposo de una semana para que la materia orgánica se estabilizara, favoreciendo la creación de un ambiente de terreno adecuado para el desarrollo de las plantas. Este enfoque garantiza un suelo enriquecido y saludable, preparado para optimizar el rendimiento del cultivo [12]. Como se muestra en la fig.2.



Fig. 2 Área del Terreno Experimental

C. Sistema de riego por goteo

Las áreas experimentales se dividen en parcelas de 2 metros por 1 metro, en las cuales se establecerán cuatro líneas de cultivo de lechuga. Entre estas líneas de lechuga, se colocarán dos líneas de riego por goteo, garantizando que el agua llegue de manera directa a la zona radicular de las plantas, lo que facilita una distribución eficiente y precisa del recurso hídrico, reduciendo así el desperdicio de agua y maximizando la eficiencia en su uso como se muestra en la figura 3.

El sistema de riego por goteo se seleccionó por su capacidad de preservar el cultivo al entregar agua de manera localizada y controlada, evitando la escorrentía y minimizando la evaporación. Esta técnica es especialmente beneficiosa en el contexto de un sistema agrovoltaico, donde se busca optimizar el uso del agua sin comprometer la eficiencia en la producción agrícola. Esta técnica de riego por goteo ha demostrado ser una de las formas más eficientes de distribución de agua en cultivos de alto valor como la lechuga, contribuyendo a una mejor uniformidad en la distribución de humedad y evitando el estrés hídrico en las plantas, lo cual es crucial para el desarrollo saludable de la lechuga [11].

El sistema de riego fue alimentado por un tanque de 60 litros, que proporcione el agua necesaria para el funcionamiento del sistema. Este tanque se ubicó de manera estratégica para asegurar un flujo constante y adecuado de agua hacia las líneas de goteo. La capacidad del tanque fue seleccionada con base en los requerimientos hídricos de las parcelas, lo que permitió mantener un suministro suficiente de agua para las plantas durante todo el ciclo de cultivo. La eficiencia en la gestión del agua es un factor fundamental para la sostenibilidad de estos sistemas, ya que su uso adecuado permite la conservación de los recursos hídricos sin afectar negativamente la productividad agrícola [15].

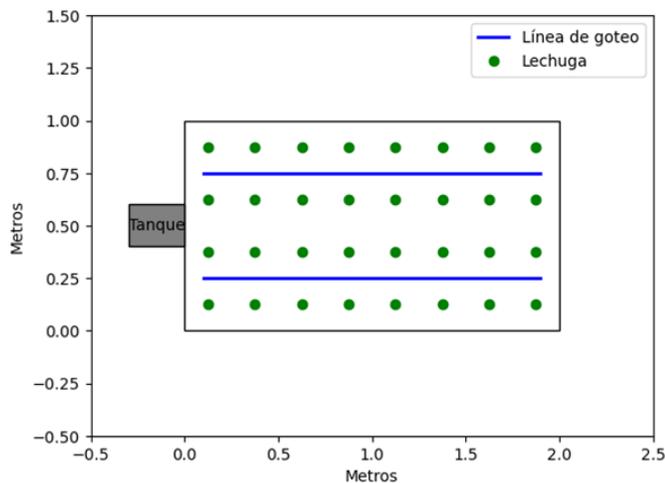


Fig. 3 Sistema de Riego por goteo.

D. Sembrado de lechugas

Para el establecimiento del cultivo, se utilizaron 64 plántulas de *Cichorium endivia* (lechuga Carola), distribuidas en dos sistemas de cultivo con características homogéneas en cuanto a las dimensiones de las parcelas (1 m x 2 m) y el espaciamiento entre plantas (25 cm x 25 cm), con un total de 32 lechugas por sistema. Ambos sistemas se implantaron en un suelo previamente preparado, con un pH inicial de 7.

E. Monitoreo

Para evaluar el crecimiento y desarrollo de las plantas de *Cichorium endivia* en los sistemas agrovoltaicos, se realizaron mediciones periódicas de diversos indicadores de crecimiento. Estas mediciones se efectuaron cada 10 días durante el ciclo de cultivo de 50 días, lo que resultó en un total de 5 mediciones. Los indicadores evaluados incluyeron la altura, el largo y el ancho de las plantas. [6]. Para la evaluación de las características físicas de la cabeza de lechuga al término de los 50 días, se midieron parámetros como el peso total de la cabeza, el diámetro, la altura y el número de hojas externa. Para la medición de la altura de la planta, se utilizó un vernier cinta métrica de precisión, midiendo desde la superficie del suelo hasta el punto más alto de la planta, expresado en centímetros. El diámetro del tallo se midió utilizando un pie de rey o regla de precisión en milímetros. Para calcular el área foliar máxima, se utilizó la longitud y el ancho de la hoja más larga y expandida, multiplicados por π , obteniendo el valor en centímetros cuadrados. Finalmente, el peso fresco de cada planta se midió utilizando una balanza electrónica con una precisión, con la unidad expresada en gramos [9]. Estos datos permitieron evaluar cómo las condiciones de luz, junto con el sistema agro-voltaico y el riego por goteo, afectan el crecimiento de las lechugas y proporcionarán información sobre el rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones experimentales.

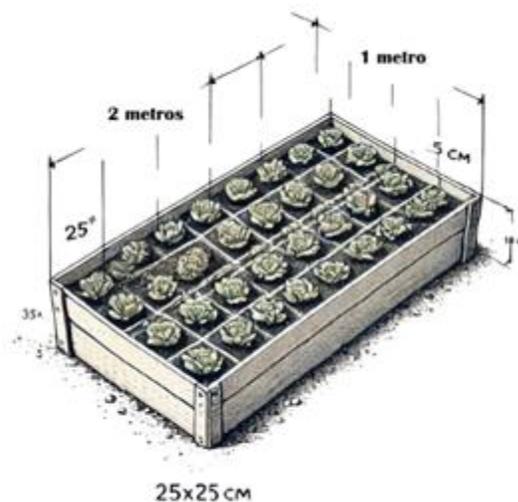


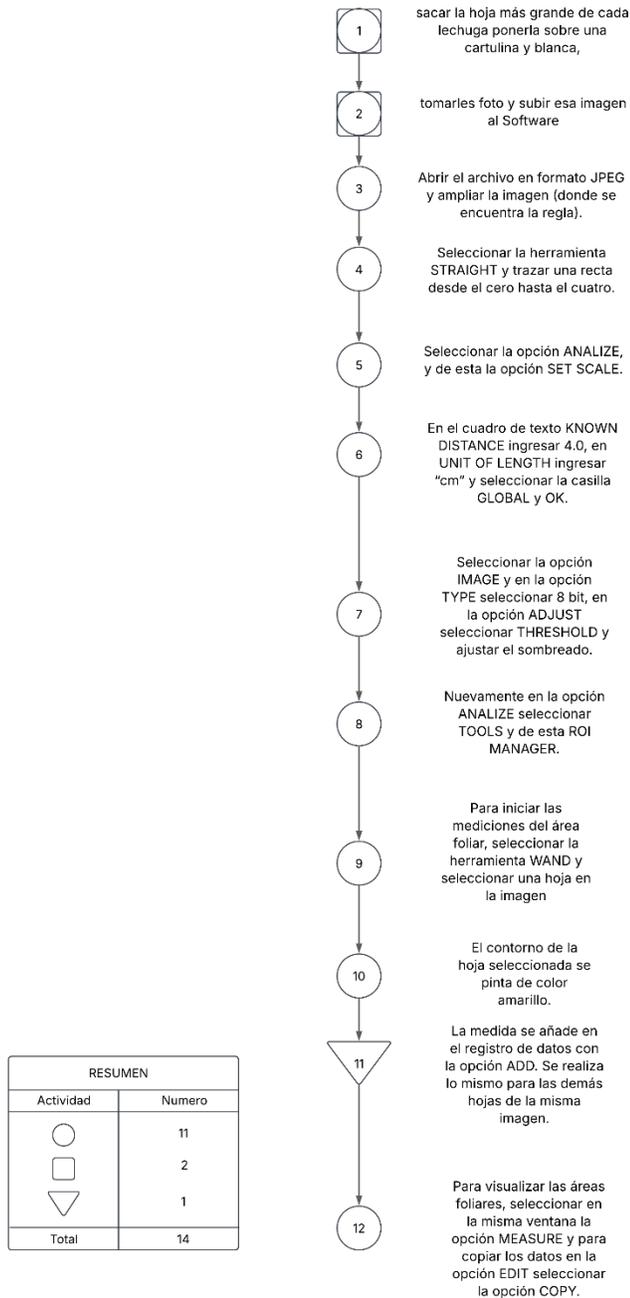
Fig. 4 Distribución de lechugas en el espacio de cultivo.

F. Medición de luminosidad

La luminosidad es un factor clave para el desarrollo de los cultivos, ya que juega un papel fundamental en el proceso de fotosíntesis y contribuye al crecimiento saludable de las plantas. En este estudio, se utilizó un medidor de luminosidad, que mide en unidades de lux, para monitorear las condiciones de luz durante el proceso de crecimiento de las lechugas [10].

El cálculo de la luminosidad permite determinar la cantidad de luz que penetró en el sistema agrovoltaico en comparación con un sistema tradicional. Esto facilita la evaluación de la intensidad y distribución de la luz dentro del sistema agrovoltaico, así como el monitoreo de otros parámetros importantes como la temperatura y la humedad. Estos datos son esenciales para analizar la efectividad del sistema agrovoltaico y su impacto en el desarrollo de los cultivos. Por lo tanto, la luminosidad se registró en intervalos diarios, desde las 5:30 a.m. hasta las 6:30 p.m., tomando mediciones cada hora en ambos sistemas. Esto permitió cuantificar la cantidad de luz incidente y evaluar la efectividad del sistema agrovoltaico en la regulación de la radiación solar.

G. Medición de área foliar



RESUMEN	
Actividad	Numero
○	11
□	2
▽	1
Total	14

Fig. 5 DOP medición del área foliar con el Software IMAGEJ

H. Medición de humedad

Cada planta recibió 300 ml de agua aproximadamente por riego, lo que significa que, para las 32 plantas del experimento, se requirió un total aproximado de 10 litros de agua por sesión.

Este volumen de riego fue determinado para asegurar que las raíces de las plantas recibieran la cantidad adecuada de humedad, evitando tanto el exceso como el déficit hídrico. El riego se implementó de manera controlada, verificando regularmente el funcionamiento del sistema para garantizar la ausencia de obstrucciones en los emisores y asegurar que todas las plantas recibieran una cantidad uniforme de agua. Se controlaron tanto el tiempo como la frecuencia del riego, ajustándolos a las condiciones ambientales y las necesidades específicas del cultivo, con el fin de maximizar el aprovechamiento del recurso hídrico y minimizar las pérdidas por evaporación o escorrentía. Al llevar el agua directamente a la zona radicular, se busca optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas, promoviendo un desarrollo uniforme y sostenible en todo el cultivo. La implementación y monitoreo constante del sistema asegurarán que el riego cumpla con los objetivos planteados, contribuyendo al éxito del experimento [13].

La frecuencia de riego en el cultivo se gestionó manualmente en función de las mediciones realizadas por un sensor capacitivo de humedad del suelo. Las plantas regaron con el sistema de goteo cuando el sensor indicó que los niveles de humedad cayeron por debajo del 80 %, asegurando que el agua llegue directamente a las raíces de las lechugas [14].

Este enfoque permitió un uso eficiente del agua, ya que el riego por goteo minimizó la evaporación y la escorrentía superficial, dirigiendo el agua exactamente donde más se necesita. Además, al controlar la humedad del suelo mediante el sensor, se evitó tanto el déficit hídrico como el riego excesivo, favoreciendo un equilibrio adecuado para el crecimiento óptimo de las lechugas [14].

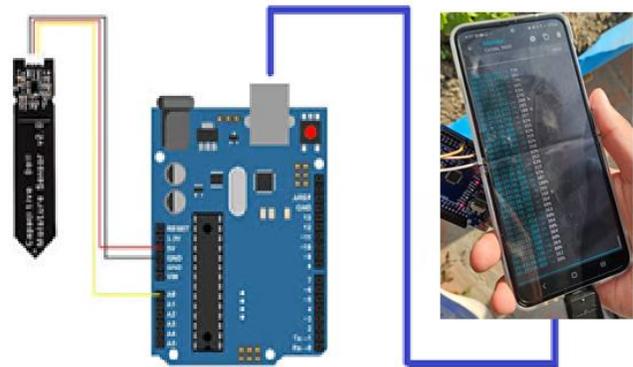


Fig. 6 Configuración del sensor Arduino a un celular Android.

III. RESULTADOS, DISCUSIONES

A. Sombreado del sistema agrovoltaico

Los resultados del ANOVA de medidas repetidas, calculado con Python, fueron de ($F = 9.93$; $p = 0.0077$), dado que F es mucho mayor que uno evidencia que los resultados no

son productos del azar y un p menos a 0.05 evidencia una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de luminosidad entre los sistemas tradicional y agrovoltaico. Esto indica que el efecto del sombreado generado por los paneles del sistema agrovoltaico impacta significativamente en la luminosidad diaria registrada.

La figura 7 muestra que el sistema tradicional mantiene niveles constantes de luminosidad a lo largo del día, alcanzando valores máximos de 2000 lux desde las 6:30 hasta las 16:30, con una ligera disminución al final del día (1500 lux). Por el contrario, el sistema agrovoltaico presenta una mayor variabilidad en los niveles de luminosidad debido al sombreado. En ciertas horas, como a las 13:30, la luminosidad es notablemente más baja (900 lux), mientras que, en otras como a las 6:30 y 16:30, iguala los valores del sistema tradicional.

Estos resultados destacan cómo el sistema agrovoltaico regula la intensidad lumínica durante el día, proporcionando un entorno más sombreado en determinadas horas.

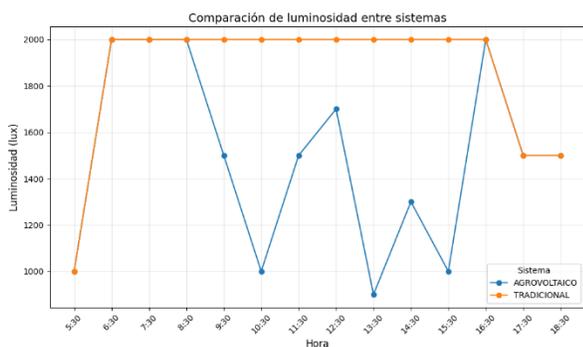


Fig. 7 Configuración de Riego por goteo, luminosidad del Sistema

B. Calidad de los cultivos

Se realizaron pruebas estadísticas para evaluar si el sistema agrovoltaico tuvo un impacto significativo en los datos de las variables de calidad de las lechugas (diámetro del tallo, peso, número de hojas, área foliar, largo y ancho). En la figura 8 podemos observar que la distribución de los valores del diámetro del tallo parece ser normal, para confirmarlo se usó la prueba de Shapiro-Wilk, ingresando los datos en Python, para el Sistema Agrovoltaico (estadístico = 0.943, p -valor = 0.093) y Sistema Tradicional (estadístico = 0.960, p -valor = 0.271), que el estadístico sea cercano a uno y el p -valor mayor a 0.05, nos sugiere que los datos siguen una distribución normal.

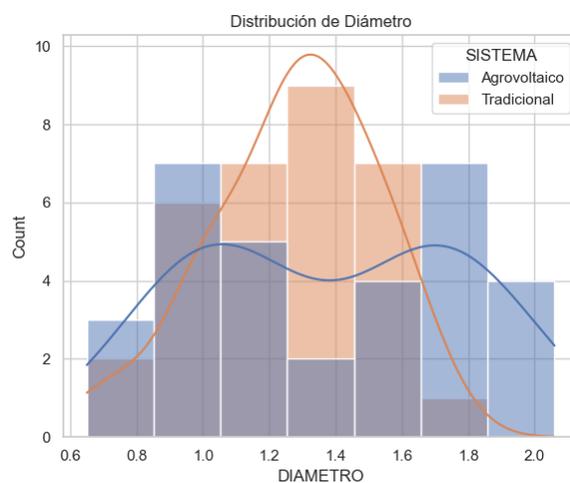


Fig. 8 Distribución del diámetro del tallo.

Dado que sigue una distribución normal se usó la prueba t independiente, para corroborar que el sistema agrovoltaico tubo influencia en el diámetro del tallo. El estadístico de la prueba fue 1.228, con un p -valor de 0.225, siendo un valor cercano a 0 nos sugiere que los valores son similares y con un p -valor mayor a 0.05 nos dice que el sistema agrovoltaico no tubo injerencia en esta variable. Caso contrario para las variables de peso, el número de hojas y el área foliar.

El área foliar en el Sistema Agrovoltaico presenta una distribución normal (estadístico = 0.954, p -valor = 0.193) mientras que en el Sistema Tradicional no lo hace (estadístico = 0.923, p -valor = 0.026).

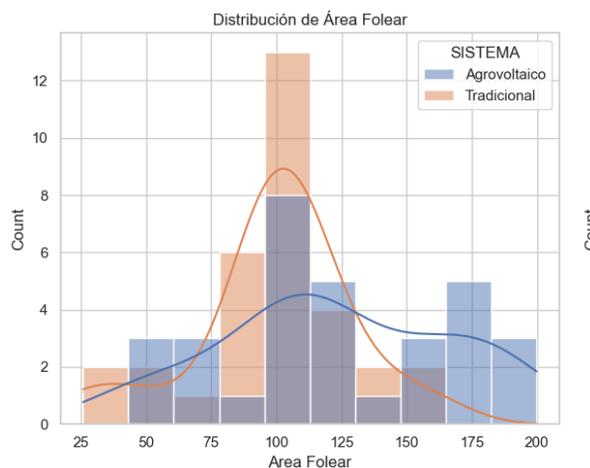


Fig. 9 Distribucion area foliar.

El peso en el Sistema Agrovoltaico no presenta una distribución normal (estadístico = 0.878, p -valor = 0.0017) mientras que en el Sistema Tradicional si lo hace (estadístico = 0.952, p -valor = 0.160).

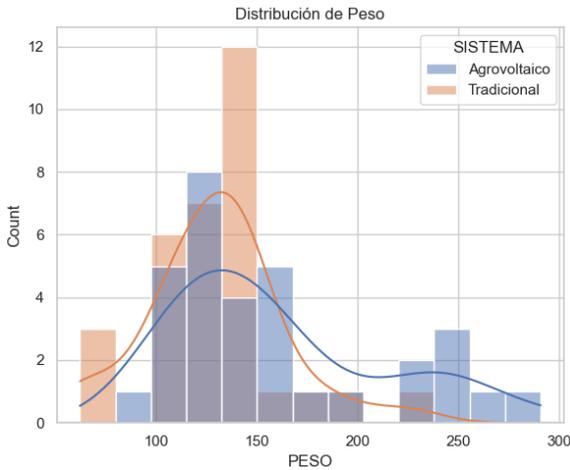


Fig. 10 Distribución peso.

Para el número de hojas ambos sistemas presentaron distribuciones no normales tanto el sistema agrovoltaico (estadístico = 0.897, p-valor = 0.0053) como el sistema tradicional (estadístico = 0.863, p-valor = 0.0008).

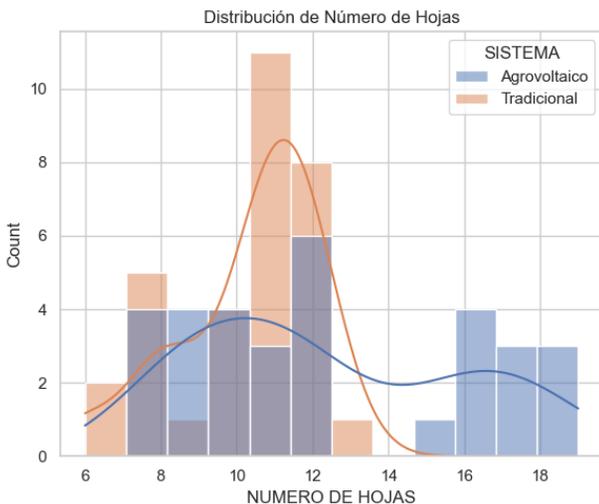


Fig. 11 Distribución número de hojas

Dado que no siguen una distribución normal las variables en ambos sistemas, se utilizó para determinar la implicancia del sistema agrovoltaico la prueba estadística de Mann-Whitney U, similar a la prueba t independiente si el valor del estadístico está muy alejado de 0 los valores entre los sistemas están muy alejados y si el p-valor es menor a 0.05 nos indica que ha habido una diferencia importante al usar un sistema o el otro.

Para el área foliar el estadístico fue 694.0, con un p-valor de 0.015. indicándonos que ha habido una diferencia significativa entre ambos sistemas.

Para el peso el estadístico de la prueba fue 677.5, con un p-valor de 0.027. Dado que el p-valor es menor a 0.05, se encontró una diferencia estadísticamente significativa en el peso entre los dos sistemas, sumando el total del peso de los cultivos de ambos sistemas, el peso total del cultivo del sistema agrovoltaico es en un 28.94% mayor que el sistema tradicional.

Para el número de hojas el estadístico fue 654.5, con un p-valor de 0.053. Aunque el p-valor es cercano a 0.05, no se encontró una diferencia estadísticamente significativa en el número de hojas entre los dos sistemas, siendo que el total de hojas de la cosecha en el sistema agrovoltaico es de 398 siendo mayor en 20.24% que el sistema tradicional cuyo total es de 331, a pesar de estas diferencias podemos ver en la figura que ambas medianas se encuentran dentro de las cajas que son el 50% de los datos lo que nos dice que los datos pueden ser similares.

Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) con Python para comparar la calidad de las lechugas cultivadas bajo los dos sistemas diferentes, utilizando variables Largo y Ancho de las lechugas. Los resultados obtenidos a continuación proporcionan una visión clara de cómo cada sistema influye en las características de las lechugas a lo largo del tiempo.

El ANOVA reveló que el sistema tiene un efecto significativo sobre el Largo ($p = 0.02007$), indicando que el tipo de sistema (Agrovoltaico vs Tradicional) influye de manera notable en la medida del Largo de las lechugas.

Por último, la interacción entre FECHA y SISTEMA también fue significativa ($p = 0.00515$), lo que sugiere que el efecto del tiempo sobre el Largo varía dependiendo del sistema utilizado como se muestra en la figura 12.

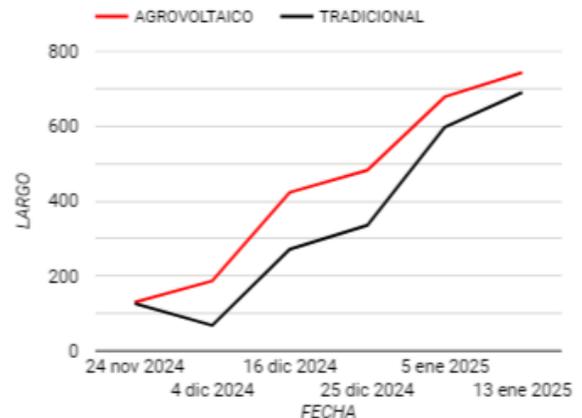


Fig. 12 Largo de cada lechuga (Sistema Agrovoltaico, Sistema tradicional)

El análisis para la variable Ancho mostró al igual que en el caso del Largo, el SISTEMA tiene un efecto significativo sobre el Ancho ($p = 0.01134$), destacando que el tipo de sistema influye en las dimensiones del Ancho de las lechugas.

La interacción entre FECHA y SISTEMA también fue significativa ($p = 0.00416$), indicando que el impacto del tiempo sobre el Ancho varía según el sistema utilizado como se muestra en la figura 13.

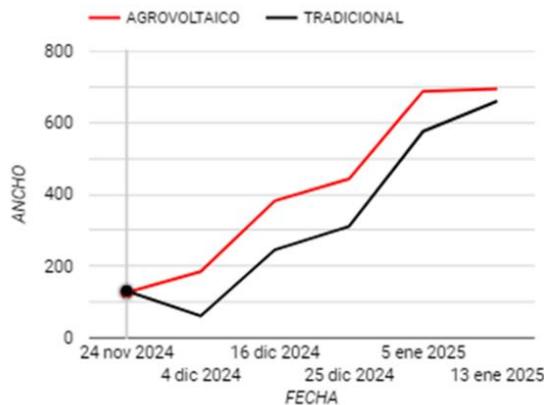


Fig. 13 Ancho de cada lechuga (Sistema Agrovoltaico, Sistema tradicional)

C. Ahorro hídrico

En la figura 12 se muestra como vario la humedad de ambos sistemas en el tiempo, cada vez que la humedad bajo al 80% se regó por lo que volvió a subir al 100% podemos ver que al comienzo necesitaron más frecuencia de riego, pero según fue avanzando ambos cultivos necesitaron menos frecuencia de riego ya que aprovechaban su propia sombra.

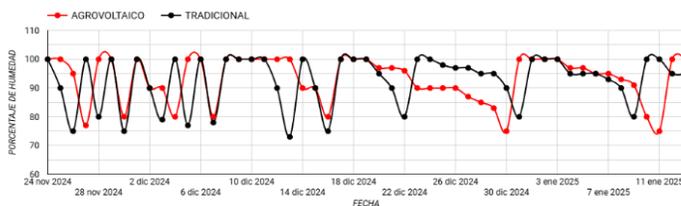


Fig. 14 Humedad de la tierra en ambos sistemas

Aunque ambos cultivos exhibieron un comportamiento comparable, como se ilustra en la Figura 14, a medida que transcurría el ciclo, el sistema tradicional demandó un mayor volumen de riego para mantener la humedad mínima necesaria en el suelo para condiciones óptimas de cultivo. Según los datos presentados en la Figura 15, al concluir el ciclo de cultivo, el sistema agrovoltaico requirió un 30.77% menos agua que el sistema tradicional. En términos específicos, el sistema tradicional utilizó 130 litros de agua, mientras que el sistema agrovoltaico consumió 90 litros.

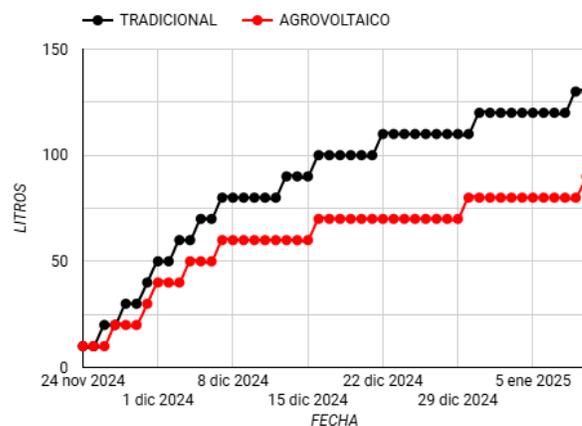


Fig. 15 Total de litros de agua aplicados en cada sistema

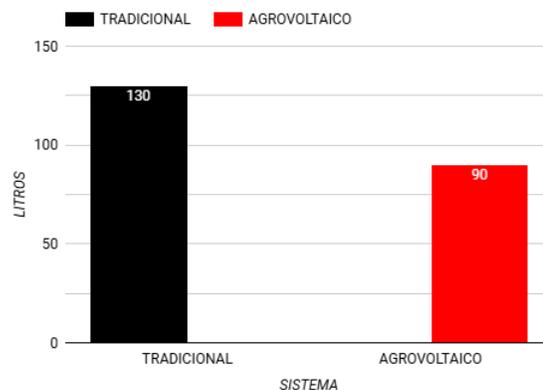


Fig. 16 Volumen de agua utilizado para el riego en cada sistema

Para el sistema tradicional, la biomasa fresca total del cultivo fue de 2535 g, mientras que en el sistema agrovoltaico se obtuvo una biomasa de 3516 g. El volumen total de riego aplicado al cultivo en el sistema tradicional fue de 130,000 ml, mientras que en el sistema agrovoltaico fue de 90,000 ml. Como resultado, la Productividad Hídrica de los sistemas fue de 0.0195 g/ml para el sistema tradicional y de 0.027 g/ml para el sistema agrovoltaico. Esto indica que la reducción del 30.77% en el consumo de agua del sistema agrovoltaico se traduce en una mayor eficiencia, produciendo un 38% más gramos de biomasa por cada mililitro de agua utilizado en comparación con el sistema tradicional.

IV. CONCLUSIONES

El análisis de la luminosidad en el estudio revela que el sistema agrovoltaico tiene un impacto significativo en la cantidad de luz en comparación con el sistema tradicional. Los resultados del ANOVA de medidas repetidas evidenciaron una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de luminosidad entre los sistemas tradicional y agrovoltaico.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que el sistema agrovoltaico tiene un impacto significativo en el desarrollo de las lechugas, particularmente en el incremento del peso y el área foliar. Estos resultados sugieren una mayor capacidad fotosintética y un crecimiento vegetativo más vigoroso en este sistema. Dichos hallazgos indican que el microclima generado por el sistema agrovoltaico, a través de su modulación de la luminosidad, favorece un crecimiento más eficiente en términos de biomasa y expansión foliar.

El total de hojas cosechadas en el sistema agrovoltaico fue un 20.24% mayor que en el sistema tradicional. Este hallazgo indica que, aunque el número de hojas por planta puede no ser significativamente diferente, la producción total de hojas sí tiende a ser mayor en el sistema agrovoltaico, lo que podría influir en la calidad y rendimiento del cultivo.

Aunque ambos sistemas presentaron un patrón similar de humedad en el suelo, el sistema tradicional requirió una mayor frecuencia de riegos para mantener las condiciones óptimas de cultivo a lo largo del tiempo. El sistema agrovoltaico no solo reduce el consumo total de agua, sino que también incrementa la productividad hídrica, lo que refleja una gestión más eficiente del recurso en comparación con el sistema tradicional. Estos resultados son cruciales para la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones áridas, como el sur del Perú, donde la disponibilidad de agua es limitada.

REFERENCIAS

- [1] L. Zhigang y X. Qinchao, «Precision Irrigation Scheduling Using ECH2O Moisture Sensors for Lettuce Cultivated in a Soilless Substrate Culture,» *MDPI*, vol. 10, 2018.
- [2] J. Zheng, S. Meng, X. Zhang, H. Zhao, X. Ning, F. Chen, A. Ali Abaker Omer, J. Ingenhoff y W. Liu, «Increasing the comprehensive economic benefits of farmland with Even-lighting Agrivoltaic Systems,» 21.
- [3] W. Zhang, Z. Yue, H. Ma, Y. Gao, W. Liu, X. Huang y L. Zhang, «Agricultural friendly single-axis dynamic agrivoltaics: Simulations, experiments and a large-scale application for Chinese solar greenhouses,» *Applied Energy*, vol. 374, 2024.
- [4] A. Weselek, A. Bauerle, J. Hartung, S. Zikeli, I. Lewandowski y P. Högy, «Agrivoltaic system impacts

on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate,» *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 41, n° 59, 2021.

- [5] E. Velarde, G. Rondan, and J. Mendoza, "Impact of an Agrovoltaic System on the Yield and Growth of Saladette Tomato Crops (*Lycopersicon esculentum* Mill) in a Semi-Arid Climate, Arequipa-Peru," *LACCEI*, vol. 1, no. 8, 2023.
- [6] P. K. Taware, «Optimizing photovoltaic conversion of solar energy,» *AIP Publishing*, vol. 11, p. 10, 2021.
- [7] L. Pereira, J. Saad, A. Cardoso, M. Silva, C. Lima y E. Silva, «Intermittent irrigation and nitrogen management optimize yield and water use efficiency in baby lettuce,» *Revista Española de Investigaciones Agrarias*, pp. 1-13, 2023.
- [8] F. Pares Olguin y P. Busch, «Renewable Energy and Energy Storage Value Chains in Latin America and the Caribbean,» *BID*, 2024.
- [9] D. Jungic, P. Turk y . B. Benko, «Moisture regime in Hortisol and lettuce yield under different mulching conditions,» *Cedntral European Agriculture*, vol. 21, pp. 354-365, 2020.
- [10] E. Hassanpur Adeh, J. Selker y C. Higgins, «Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency,» *Plos.One*, vol. 11, p. 13, 2018.
- [11] D. Jung, «Price for covering cropland with an agrivoltaic system: PV panels replacing shading nets in Chilean blueberry cultivation,» *AIP Publishing*, p. 9, 2022.
- [12] D. Deb y S. Dutta, «The robustness of land equivalent ratio as a measure of yield advantage of multi-crop systems over monocultures,» *Cambridge University Press*, vol. 3, 2022.
- [13] G. Conversa, A. Bonasia, C. Lazzizzera, P. La Rotonda y A. Elia, «Reduction of Nitrate Content in Baby-Leaf Lettuce and Cichorium endivia Through the Soilless Cultivation System, Electrical Conductivity and Management of Nutrient Solution,» *ORIGINAL RESEARCH*, vol. 12, 2021.
- [14] R. Chopdar, N. Sengar, N. Chandra Giri y D. Halliday, «Comprehensive review on agrivoltaics with technical, environmental and societal insights,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 197, 2024.
- [15] G. G. Rondán-Sanabria, E. S. Flores Sacsi, E. R. Delgado Huamani, and E. A. Velarde Allazo, "Evaluation of radish (*Raphanus sativus* L.) crop productivity under shading in an agrovoltaic system in two seasons of the year in Arequipa, Perú – 2023,doi: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442298.