



**Escuela Politécnica  
Superior - Huesca**  
**Universidad Zaragoza**

## **ENSAYO DEL EFECTO DE LA AGRIVOLTAICA SOBRE PLANTAS AROMÁTICAS Y HORTÍCOLAS**

**YERAY FERNÁNDEZ SANTANA**

TUTOR: JOSÉ CASANOVA GASCÓN

COTUTOR: JULIANA NAVARRO ROCHA

## **DECLARACIÓN DE AUTORIA**

Yo, Yeray Fernández Santana, declaro que el Trabajo Fin de Grado que presento para su exposición y defensa es original y que todas las fuentes para su utilización han sido debidamente citadas en el mismo.

En Zaragoza, a 2 de mayo de 2025.

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yeray', with a stylized, overlapping flourish underneath.

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN. ....</b>	<b>11</b>
<b>1.2. FUNDAMENTOS DE LA AGRIVOLTAICA .....</b>	<b>12</b>
1.2.1. TIPOS DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS .....	13
<b>1.3. MARCO GLOBAL Y JURÍDICO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.4. IMPACTO DE LA AGRIVOLTAICA EN SISTEMAS AGRICOLAS.....</b>	<b>17</b>
1.4.1. INFLUENCIA EN EL MICROCLIMA Y RECURSOS NATURALES: .....	17
1.4.2. IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA.....	17
<b>1.5. INTERACCIÓN CON LA RADIACIÓN E ILUMINACIÓN .....</b>	<b>19</b>
1.5.1. IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL. ....	19
1.5.2. IRRADIANCIA DIFUSA HORIZONTAL ANUAL.....	20
1.5.3. ILUMINANCIA GLOBAL HORIZONTAL ANUAL. ....	21
1.5.4. ILUMINANCIA DIFUSA HORIZONTAL ANUAL. ....	21
1.5.5. PROMEDIO DE CIELOS NOCTURNOS, SOLEADOS Y NUBLADOS.....	22
<b>2. OBJETIVOS TRABAJO .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1. OBJETIVOS GENERALES .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. AREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACIÓN .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2. GESTIÓN AGRONÓMICA.....</b>	<b>24</b>
3.2.1. CULTIVOS HORTÍCOLAS .....	24
3.2.2. CULTIVOS AROMÁTICOS Y MEDICINALES.....	25
<b>3.3. MATERIAL VEGETAL .....</b>	<b>25</b>
3.3.1. MATERIAL VEGETAL HORTÍCOLAS .....	25
3.3.2. MATERIAL VEGETAL AROMÁTICAS Y MEDICINALES .....	26
<b>3.4. DATOS CLIMÁTICOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5. ANÁLISIS DEL SUELO .....</b>	<b>27</b>
<b>3.6. ANÁLISIS DEL AGUA .....</b>	<b>28</b>
<b>3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>29</b>
<b>3.8. MÉTODOS DE MEDIDA.....</b>	<b>29</b>
3.8.1. SPAD .....	29
3.8.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (LAI) E INTERCEPTACIÓN DE LUZ (TAU) .....	30
3.8.3. FLUORÍMETRO .....	31
<b>3.9. PRODUCCIÓN Y PESOS.....</b>	<b>32</b>

<b>3.10. CULTIVOS AROMÁTICOS Y MEDICINALES.....</b>	<b>33</b>
3.10.1. DESTILACIÓN.....	33
3.10.2. CROMATOGRAFÍAS .....	34
<b>3.11. SIMULACIONES.....</b>	<b>34</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. CEPTÓMETRO .....</b>	<b>35</b>
4.1.1. BORRAJA.....	35
4.1.2. PUERRO .....	38
4.1.3. ACELGA .....	41
.....	43
<b>4.2. SPAD.....</b>	<b>44</b>
4.2.1. BORRAJA .....	44
4.2.2. PUERRO .....	45
4.2.3. ACELGA .....	46
<b>4.3. FLUORÍMETRO .....</b>	<b>46</b>
4.3.1. PUERRO .....	46
4.3.2. ACELGA .....	51
<b>4.4. RESULTADOS PLANTAS AROMÁTICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.1. RENDIMIENTOS.....</b>	<b>55</b>
4.4.1.1. Salvia.....	55
4.4.1.2. Menta .....	57
4.4.1.3. Orégano.....	58
4.4.1.4. Ajenjo .....	59
<b>4.5. RESULTADOS DE LA ANALÍTICA DE LOS COMPUESTOS .....</b>	<b>61</b>
4.5.1. Salvia.....	61
4.5.2. Orégano.....	62
4.5.3. Menta .....	63
4.5.4. Ajenjo. ....	63
<b>4.6. SIMULACIONES .....</b>	<b>64</b>
4.6.1. SIMULACIONES DEL SOMBREADO .....	64
4.6.2. SIMULACIONES DEL USO DEL AGUA Y EL CRECIMIENTO .....	64
<b>5. DISCUSIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1. CULTIVOS HORTÍCOLAS.....</b>	<b>65</b>
5.1.1. SPAD .....	65
5.1.2. CEPTÓMETRO.....	68
5.1.3. FLUORÍMETRO.....	71
5.1.4. PLANTAS AROMÁTICAS.....	73
<b>6. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>74</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEJO A. DATOS CROMATOGRAFÍAS PLANTAS AROMÁTICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEJO B. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA LOS PARÁMETROS ANALIZADOS.....</b>	<b>89</b>

<b>ANEJO C. MATERIAL FOTOGRÁFICO ADICIONAL.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEJO D. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA Y SUELO.....</b>	<b>96</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Incremento de la capacidad instalada en el mundo proyectada para el 2040 por fuente de energía (Clandestino Muñoz, 2020).....	11
Figura 2. Comparación de eficiencia entre la agricultura tradicional y la agrivoltaica (Abidin et al., 2021).....	12
Figura 3: (a)Diseño de paneles solares dinámicos (Disciglio et al., 2023); (b)Paneles solares dinámicos con diferentes dimensiones adaptadas al sistema (Amaducci et al., 2018).....	15
Figura 4. Curva de respuesta a la luz por parte de las plantas (Willockx et al., 2020a). ....	18
Figura 5. Entorno de plantación y estructura de sombreo.....	24
Figura 6. Toma de muestras de suelo con barrena cilíndrica para su posterior análisis fisicoquímico en laboratorio. ....	28
Figura 7. Análisis de textura de las muestras analizadas: zona siempre iluminada (azul) y zona de sombreo (rojo). ....	28
Figura 8. Medición del índice SPAD en hojas de acelga mediante clorofilómetro SPAD-502Plus (MINOLTA).....	30
Figura 9. Medición de la radiación en el cultivo de acelga mediante ceptómetro AccuPAR LP-80 (METER).....	31
Figura 10:(a) Determinación del estado fisiológico de acelga mediante fluorímetro portátil Handy-Pea+ (HANSATECH); b) Medición en puerro con el mismo equipo para evaluar la fluorescencia clorofílica. ....	32
Figura 11. Ejemplares de puerro cosechados para la determinación de su peso fresco y seco. ....	32
Figura 12.Proceso de preparación para la elaboración de aceite esencial de ajeno. ....	34
Figura 13. Valor del parámetro Tau (T) en el cultivo de la borraja a lo largo de las cuatro horas de medición y las distintas filas. ....	35
Figura 14. Evolución del parámetro LAI a lo largo de las horas y en las distintas filas. ....	36
Figura 15. Distribución del parámetro Tau, medido por arriba y por debajo del dosel, para el cultivo de la borraja. ....	36
Figura 16. Valores del índice de área foliar (LAI), medidos en la parte superior e inferior del cultivo, para el cultivo de la borraja.....	37
Figura 17. Valor del parámetro Tau (T) en el cultivo del puerro a lo largo de las cuatro horas de medición y las distintas filas. ....	39

Figura 18. Evolución del parámetro LAI a lo largo de las horas y las distintas filas.	39
Figura 19. Distribución del parámetro Tau, medido por arriba y por debajo del dosel, para el cultivo del puerro.	40
Figura 20. Valores del índice de área foliar (LAI), medidos en la parte superior e inferior del cultivo, para el cultivo del puerro.	40
Figura 21. Valor del parámetro Tau (T) en el cultivo de la acelga a lo largo de las cuatro horas de medición y las distintas filas.	42
Figura 22. Evolución del parámetro LAI a lo largo de las horas y las distintas filas.	42
Figura 23. Distribución del parámetro Tau, medido por arriba y por debajo del dosel, para el cultivo de la acelga.	43
Figura 24. Valores del índice de área foliar (LAI), medidos en la parte superior e inferior del cultivo, para el cultivo de la acelga.	43
Figura 25. Valores SPAD para el cultivo de la borraja.	44
Figura 26. Valores SPAD para el cultivo del puerro.	45
Figura 27. Valores SPAD para el cultivo de la acelga.	46
Figura 28. Evolución del parámetro Fo a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.	48
Figura 29. Evolución del parámetro Fm a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.	49
Figura 30. Evolución del parámetro Fv a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.	49
Figura 31. Evolución del parámetro Fv/Fm a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.	50
Figura 32. Evolución del parámetro Fo/Fm a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.	50
Figura 33. Evolución del parámetro Phi(Po) a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.	51
Figura 34. Evolución del parámetro Fo a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.	52
Figura 35. Evolución del parámetro Fm a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.	53
Figura 36. Evolución del parámetro Fv a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.	53
Figura 37. Evolución del parámetro Fo/Fm a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.	54
Figura 38. Evolución del parámetro Fv/Fm a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.	54
Figura 39. Evolución del parámetro Phi(Po) a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.	55
Figura 40. Distribución del rendimiento de salvia en función del año y el tratamiento lumínico.	56

Figura 41. Distribución del rendimiento de menta en función del año y el tratamiento lumínico. ....	58
Figura 42. Distribución del rendimiento de orégano en función del año y el tratamiento lumínico. ....	59
Figura 43. Distribución del rendimiento de ajeno en función del año y el tratamiento lumínico. ....	61
Figura 44. Simulación del sistema agrivoltaico: (a) comparación de la radiación solar incidente diaria con y sin sombreo; (b) vista del modelo SketchUp con la estructura y malla de sombreo; (c-d) vista superior de la estructura con distribución de sombra. ....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Representación de las opciones de uso agrícola en sistemas agrivoltaicos de categoría I (sistemas elevados cuyos paneles se sitúan a una altura suficiente) y de categoría II (sistemas que se sitúan en el espacio libre entre filas). Fuente: DIN SPEC 914.....	14
Tabla 2. Datos de interés cultivos hortícolas (Com.per.).....	25
Tabla 3. Estados fenológicos de acelga, puerro y borraja (Com.per.).....	26
Tabla 4. Especies aromáticas y medicinales establecidas en el ensayo, con el número de plantas y fechas de plantación y recolección (Com.per.).....	26
Tabla 5. Medidas mensuales de climatología en 2023.....	27
Tabla 6. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro Tau (T) del cultivo de la borraja. ....	37
Tabla 7. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro LAI del cultivo de la borraja. ....	38
Tabla 8. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro LAI del cultivo del puerro. ....	41
Tabla 9. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro LAI del cultivo de la acelga.....	44
Tabla 10. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para salvia. ....	56
Tabla 11. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para menta. ....	57
Tabla 12. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para orégano.....	58
Tabla 13. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para ajeno.....	60
Tabla 14. Resultados simulados de biomasa total (kg/ha), evapotranspiración (mm) y eficiencia en el uso del agua (WUE, kg/m <sup>3</sup> ) bajo condiciones de sombra y sin sombra para los tres cultivos estudiados. ....	65



## RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado estudia los efectos de la agrivoltaica sobre cultivos de plantas hortícolas, aromáticas y medicinales, evaluando su desarrollo fisiológico, rendimiento y calidad bajo distintas condiciones de sombreado simuladas. Para reproducir el efecto de estructuras fotovoltaicas, se aprovechó la infraestructura de un antiguo invernadero y se instalaron telas opacas en una de sus vertientes, generando diferentes niveles de radiación incidente sin la necesidad de emplear paneles solares activos. Esta metodología permitió estudiar, de forma controlada, el impacto del sombreado sobre tres cultivos hortícolas: acelga (*Beta vulgaris* L.), puerro (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*) y borraja (*Borago officinalis* L.), así como sobre cuatro especies aromáticas: Salvia (*Salvia officinalis*), orégano (*Origanum vulgare* var. *virens*), menta (*Mentha rotundifolia*) y ajenjo (*Artemisia absinthium* var. *condalia*). Se analizaron variables como el índice de área foliar (LAI), SPAD, fluorescencia de la clorofila, biomasa y composición de aceites esenciales mediante cromatografía. Además, se contextualiza el trabajo dentro del marco normativo y climático europeo, subrayando el potencial de la agrivoltaica como estrategia para compatibilizar la producción agrícola con la generación de energías limpias. Los resultados sugieren la utilidad de este tipo de estudios para avanzar hacia una agricultura más sostenible y adaptada al cambio climático.

**Palabras clave:** agrivoltaica, sombreado, cultivos hortícolas, plantas aromáticas, sostenibilidad agrícola, aceites esenciales, eficiencia en el uso del suelo.

## ABSTRACT

This Bachelor's Thesis investigates the effects of agrivoltaics on horticultural, aromatic, and medicinal plant crops by evaluating their physiological development, yield, and quality under different simulated shading conditions. To reproduce the effect of photovoltaic structures, the infrastructure of an old greenhouse was used, and opaque nets were installed on one of its slopes, generating varying levels of incident radiation without the need for active solar panels. This methodology allowed for the controlled study of shading impacts on three horticultural crops: Swiss chard (*Beta vulgaris* L.), leek (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*), and borage (*Borago officinalis* L.), as well as on four aromatic species: sage (*Salvia officinalis* L.), oregano (*Origanum vulgare* L.), mint (*Mentha rotundifolia* L.), and wormwood (*Artemisia absinthium* L.). Variables such as leaf area index (LAI), SPAD, chlorophyll fluorescence, biomass, and essential oil composition (via chromatography) were analyzed. Additionally, the study is contextualized within the European regulatory and climatic framework, highlighting the potential of agrivoltaics as a strategy to combine agricultural production with the generation of

clean energy. The results suggest the usefulness of this type of study in moving toward more sustainable agriculture adapted to climate change.

**Keywords:** agrivoltaics, shading, horticultural crops, aromatic plants, agricultural sustainability, essential oils, land use efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN.

El cambio climático, impulsado por el uso masivo de combustibles fósiles, está afectando gravemente a los sistemas agrícolas. Según la FAO y diversos estudios (Elamri *et al.*, 2018; López Luque *et al.*, 2023) se prevé un aumento de las temperaturas estivales de hasta 4-5°C, junto con una disminución del 20% en las precipitaciones durante la primavera y el verano en regiones mediterráneas. Esto conlleva un incremento en la demanda hídrica de los cultivos, una menor disponibilidad de agua para riego y, en consecuencia, una reducción en el rendimiento agrícola. A pesar de esta situación, el IPCC (2022) señala que, con una acción climática ambiciosa, aún es posible limitar el calentamiento global a 1,5°C.

Para afrontar estos desafíos, la Unión Europea ha lanzado políticas como el Pacto Verde Europeo (*Green Deal*), cuyo objetivo es alcanzar la neutralidad climática en 2050 mediante un sistema productivo sostenible. Dentro de este marco, el programa Fit for 55 propone aumentar la participación de fuentes renovables en el mix energético hasta un 32-40% antes de 2030, promoviendo además inversiones en tecnologías limpias (López Luque *et al.*, 2023).

No obstante, la transición energética debe ir de la mano con la seguridad alimentaria, especialmente en un contexto de recursos naturales cada vez más limitado. La producción de alimentos y energía está intrínsecamente ligada al crecimiento demográfico, generando un conflicto en el uso del suelo: ¿destinarlo a agricultura o a energía? Las energías renovables también implican desafíos, siendo uno de los principales su elevado requerimiento de superficie (Clandestino Muñoz, 2020).

La Figura 1 ilustra la evolución proyectada de la capacidad instalada de fuentes de energía a nivel mundial para 2040, mostrando el creciente protagonismo de la energía solar fotovoltaica.

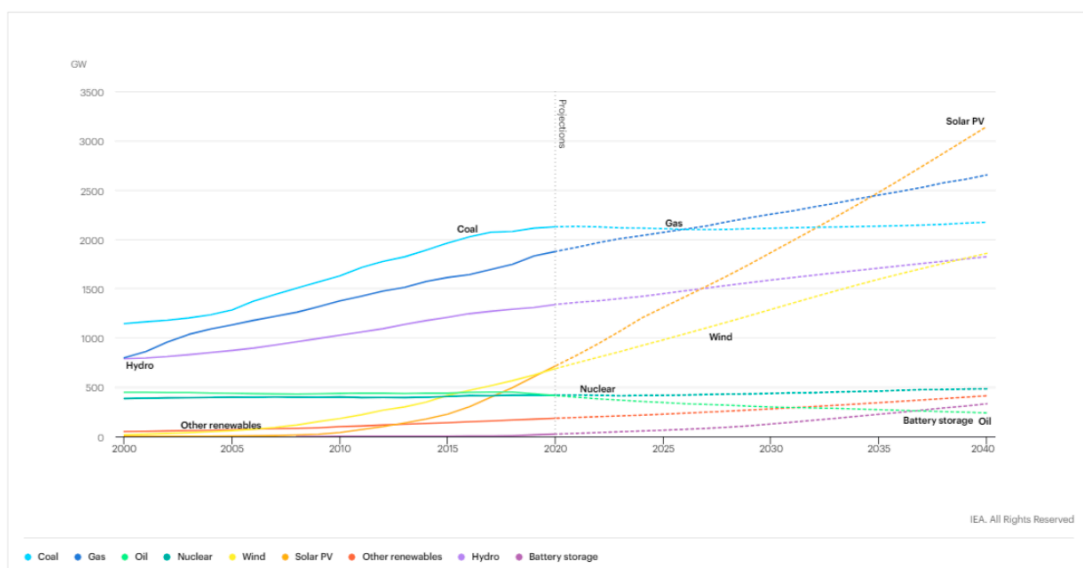


Figura 1. Incremento de la capacidad instalada en el mundo proyectada para el 2040 por fuente de energía (Clandestino Muñoz, 2020).

Frente a estos retos energéticos y alimentarios, la agrivoltaica surge como un concepto innovador a nivel mundial (Elamri *et al.*, 2018). Este concepto de sistema agrivoltaico fue introducido por Goetzberger y Zastrow en 1981, al estudiar el uso combinado de la tierra para la producción concomitante agrícola-eléctrica, pero tuvieron que pasar unas tres décadas hasta que este concepto se puso en práctica en diversos proyectos y plantas piloto de todo el mundo (Disciglio *et al.*, 2023).

En la Figura 2 se muestra cómo, gracias a la agrivoltaica, es posible alcanzar una mayor eficiencia al combinar la producción agrícola con la generación de energía.

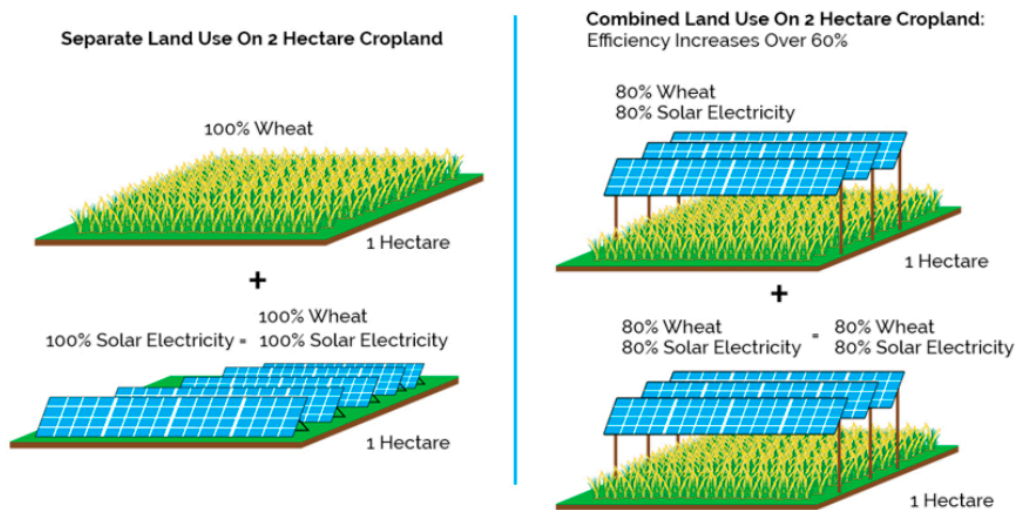


Figura 2. Comparación de eficiencia entre la agricultura tradicional y la agrivoltaica (Abidin *et al.*, 2021).

## 1.2. FUNDAMENTOS DE LA AGRIVOLTAICA

Los sistemas agrivoltaicos constituyen una solución innovadora que integra la producción agrícola y la generación de energía solar en un mismo terreno. Frente a los campos tradicionales, que compiten con la agricultura por el uso del suelo, la agrivoltaica plantea un modelo sinérgico en el que los paneles se elevan 2-5 metros del suelo, permitiendo simultáneamente el desarrollo de cultivos y la captación de energía solar (Poonia *et al.*, 2020; Alparslan *et al.*, 2021; Disciglio *et al.*, 2023).

El concepto fue propuesto por Goetzberger y Zastrow en 1981, pero no se implementó a escala real hasta 2004 con un piloto en Japón (Nagashima), y más tarde en China, que actualmente lidera la capacidad instalada a nivel mundial (López Luque *et al.*, 2023).

Estos sistemas se basan en varios principios fundamentales:

**Uso Eficiente de la Tierra:** La agrivoltaica permite aprovechar una misma superficie para dos funciones: alimentar y generar electricidad. Esta doble utilidad se evalúa mediante la Razón Equivalente de la Tierra (LER), que puede superar el 100%. Por ejemplo, en un estudio del Instituto Fraunhofer ISE se obtuvo un LER del

186% en cultivos de patata en Alemania (Sainz de Murieta Mangado *et al.*, 2024; Abidin *et al.*, 2021).

**Gestión eficiente del agua:** la sombra intermitente de los paneles reduce la evapotranspiración, disminuye el estrés hídrico y mejora la eficiencia del riego. Esto es especialmente relevante en regiones áridas. Además, estos sistemas permiten una gestión más controlada del riego y pueden contribuir a redistribuir mejor el agua de lluvia (Clandestino Muñoz, 2020; Elamri *et al.*, 2018; Mamun *et al.*, 2022).

**Beneficios Múltiples:** los sistemas agrivoltaicos aportan ventajas económicas (diversificación de ingresos), sociales (mayor aceptación local de la fotovoltaica) y ecológicas (reducción de emisiones y protección del suelo). También pueden mejorar la resiliencia agrícola frente al cambio climático (Amaducci *et al.*, 2018; Potenza *et al.*, 2022; Cassanta Vidotto *et al.*, 2024).

**Adaptabilidad y Diseño:** el diseño de un sistema agrivoltaico debe ajustarse a las necesidades del cultivo, el clima y la maquinaria agrícola. Aspectos clave como la altura, la orientación e inclinación de los paneles son determinantes. Paneles con ángulos más pronunciados captan más energía, pero reducen la luz del cultivo; por eso, se recomienda usar inclinaciones suaves o paneles semitransparentes (Willockx *et al.*, 2020b; Zainali *et al.*, 2023; Trommsdorff *et al.*, 2021).

**Impacto Ambiental y Social:** la agrivoltaica contribuye a reducir los gases de efecto invernadero y a mejorar la percepción ciudadana sobre las renovables. También ayuda a preservar suelos agrícolas en zonas periurbanas, evita la expansión urbana y fortalece la seguridad alimentaria (Majumdar *et al.*, 2018; Pascaris *et al.*, 2022).

**Investigación y Desarrollo:** se requiere una constante adaptación de los sistemas a distintos tipos de cultivos y condiciones locales. En zonas áridas, la sombra generada reduce el estrés térmico en las plantas, incrementando su eficiencia fisiológica y alargando los ciclos productivos (Alparslan *et al.*, 2021; Cassanta Vidotto *et al.*, 2024).

### 1.2.1. TIPOS DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS

La integración de energía solar en entornos agrícolas admite múltiples configuraciones. A grandes rasgos existen tres tipos principales:

1. Sistemas en instalaciones fotovoltaicas preexistentes, que adaptan el espacio entre paneles ya instalados.
2. Sistemas diseñados para la coproducción, como el modelo “Agrivoltaico” desarrollado por REM Tec en Italia.
3. Sistemas de diseño optimizado, donde la prioridad es proteger y favorecer el cultivo, elevando y espaciando los paneles desde el origen.

En cuanto a la disposición espacial, se diferencian los sistemas cerrados (invernaderos fotovoltaicos) y abiertos. Dentro de estos últimos, la norma alemana DIN SPEC 91434 establece dos categorías principales en función de la altura y el uso del suelo. Un resumen más detallado se explica en la tabla 1.

*Tabla 1. Representación de las opciones de uso agrícola en sistemas agrivoltaicos de categoría I (sistemas elevados cuyos paneles se sitúan a una altura suficiente) y de categoría II (sistemas que se sitúan en el espacio libre entre filas). Fuente: DIN SPEC 914.*

SISTEMA AGRIVOLTAICO	USOS	EJEMPLOS
Categoría I: sistemas elevados cuyos paneles se sitúan a una altura suficiente para permitir el paso de la maquinaria agrícola, al igual que los pilares de apoyo. Se colocan a una altura de 2,1 metros hasta un máximo de 5 metros.	Cultivos permanentes y perennes	Fruticultura, frutos rojos, viticultura y lúpulo
	Cultivos anuales y plurianuales	Cultivos herbáceos y hortícolas
	Praderas permanentes para siega	Praderas de explotación intensiva y praderas de uso extensivo
	Pradera permanente utilizada como pasto	Praderas permanentes, pastos (como por ejemplo ganado vacuno, aves de corral, ovejas, cerdos y cabras)
Categoría II: sistemas que se sitúan en el espacio libre entre las filas de los colectores solares, es decir, siguiendo una disposición interespacial.	Cultivos permanentes y perennes	Fruticultura, frutos rojos, viticultura y lúpulo
	Cultivos anuales y plurianuales	Cultivos herbáceos, cultivos hortícolas, praderas temporales, cultivos forrajeros
	Praderas permanentes de siega	Praderas de explotación intensiva, praderas de uso extensivo
	Pradera permanente utilizada como pasto	Pradera permanente, porción pastos (por ejemplo, ganado vacuno, aves de corral, ovejas, cerdos y cabras)

Además, los sistemas pueden ser:

- Fijos: con una inclinación constante (más barato, pero con sombreado menos controlable).
- Dinámicos: con seguimiento solar o estructuras móviles que permiten ajustar el nivel de sombra según las necesidades del cultivo. Un ejemplo son los sistemas con paneles que giran hasta  $\pm 50^\circ$  para optimizar la captación solar (Disciglio *et al.*, 2023; Amaducci *et al.*, 2018). En las Figura 3 se puede observar con más detalle el diseño de estos paneles.

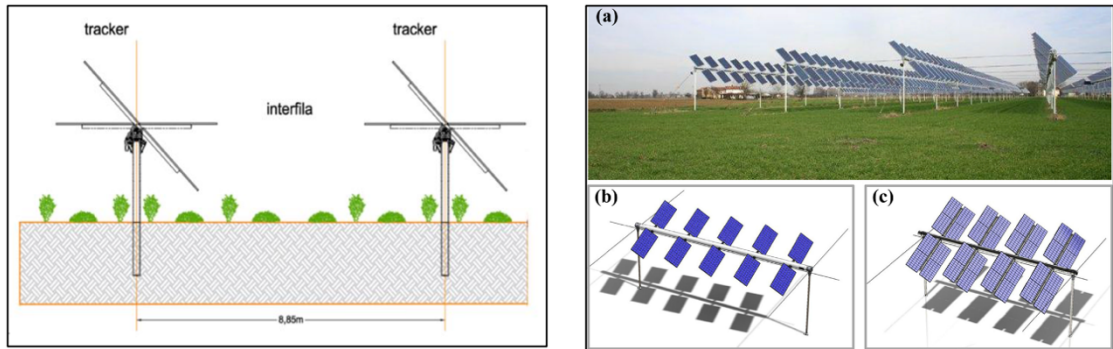


Figura 3: (a)Diseño de paneles solares dinámicos (Disciglio *et al.*, 2023); (b)Paneles solares dinámicos con diferentes dimensiones adaptadas al sistema (Amaducci *et al.*, 2018).

En conclusión, la agrovoltaica representa una estrategia prometedora para la integración de la producción agrícola y la generación de energía renovable. Su desarrollo continuo y la implementación de nuevas tecnologías permitirán maximizar los beneficios tanto para la sostenibilidad agrícola como para la transición energética global.

### 1.3. MARCO GLOBAL Y JURÍDICO

El marco normativo de la agrovoltaica aún es incipiente en la Unión Europea, sin una regulación específica que lo rijan de forma integral. La normativa actual es fragmentada y se encuadra dentro de políticas generales sobre energías renovables y agricultura, como la Directiva de Energías Renovables (2018/2001), modificada por la 2022/0160, y el Reglamento (UE) 2021/2115 de la PAC, que podrían favorecer el desarrollo de la agrovoltaica si se articulan mecanismos específicos (López Luque *et al.*, 2023).

El plan REPowerEU y la Estrategia de Energía Solar de la UE (2022) destacan la necesidad de ampliar la capacidad fotovoltaica, señalando la agrovoltaica como una opción viable que evita conflictos con la producción agrícola (European Parliament, 2025).

**Japón** ha sido pionero en establecer una regulación específica para la agrovoltaica, basada en el concepto de "solar sharing", que permite la instalación de sistemas

fotovoltaicos sin interrumpir la producción agrícola. Desde 2013, existen directrices técnicas claras y una tarifa regulada mejorada para proyectos que cumplan requisitos como estructuras elevadas, continuidad de la actividad agrícola y rendimiento mínimo del 80% respecto al estándar local (López Luque *et al.*, 2023).

**Alemania**, mediante la Ley de Energías Renovables (EEG), ha reconocido oficialmente la agrovoltaica, incluyendo incentivos, prioridad de conexión a red y un segmento específico de licitaciones para sistemas innovadores como la agrovoltaica. En 2022, se introdujo la norma técnica DIN SPEC 91434, que establece pautas para el diseño y gestión de estos sistemas (Unión Española Fotovoltaica (UNEF), 2023; PV Magazine, 2021).

**Italia** ha asignado más de 1.100 millones de euros del PNRR a proyectos agrovoltaicos. Las directrices nacionales exigen que al menos el 70% del terreno se use para agricultura, establecen alturas mínimas para los paneles y un sistema de monitoreo técnico y agrícola. Solo los sistemas clasificados como AgroFV avanzado pueden optar a ayudas (López Luque *et al.*, 2023; Unión Española Fotovoltaica (UNEF), 2023).

**Francia** ha impulsado la agrovoltaica a través de subastas específicas desde 2017 y una legislación reciente que integra esta tecnología en la transición energética. La Agencia de Transición Ecológica (ADEME) publicó en 2021 una guía para caracterizar proyectos agrovoltaicos, y el nuevo Proyecto de Ley para la Aceleración de Energías Renovables refuerza su desarrollo (Blanco *et al.*, 2023; Unión Española Fotovoltaica (UNEF), 2023).

**España** ha incorporado la agrovoltaica en documentos estratégicos como el Plan de Recuperación, la Ley 7/2021 y el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC). La Orden CIN/533/2022 y el Plan Estratégico de la PAC (PEPAC) también contribuyen a su promoción, aunque sin una normativa específica. Algunas comunidades, como Cataluña, han adoptado decretos concretos para regularla (López Luque *et al.*, 2023; Unión Española Fotovoltaica (UNEF), 2023; Sainz de Murieta Mangado *et al.*, 2024).

En Aragón, existen experiencias relevantes como el Parque El Aliagar y el Grupo de Cooperación Agrovoltaica en el Alto Aragón, aunque las restricciones sobre ciertos tipos de regadío dificultan el desarrollo del modelo en algunas zonas. El proyecto solar Vendimia, de Lightsource BP, representa un ejemplo de gran escala que combina generación renovable y desarrollo regional (Forestalia, 2022; Lightsource BP, 2024).

El sector fotovoltaico en España genera más de 89.000 empleos y representa el 0,4% del PIB. El país tiene un elevado potencial para la agrovoltaica por su gran superficie agrícola y su alta radiación solar (Blanco *et al.*, 2023).

La PAC permite recibir ayudas en tierras con agrovoltaica siempre que se mantenga la actividad agrícola, no haya estructuras permanentes que impidan el cultivo y no se interrumpa la actividad más de 60 días (Reglamento UE No 1307/2013).

#### 1.4. IMPACTO DE LA AGRIVOLTAICA EN SISTEMAS AGRICOLAS

La agrovoltaica combina producción energética y actividad agraria, generando efectos significativos en aspectos como el microclima, los recursos naturales, la productividad y la fisiología de los cultivos. A continuación, se resumen sus principales impactos:

##### 1.4.1. INFLUENCIA EN EL MICROCLIMA Y RECURSOS NATURALES:

**TEMPERATURA:** Los sistemas agrovoltaicos reducen la radiación solar incidente (hasta un 42%) y la PAR ( $\approx 30\%$ ), lo que crea un entorno más favorable para ciertos cultivos, especialmente en climas cálidos y secos (Fraunhofer Chile, 2018; Weselek *et al.*, 2021). Esta sombra puede mejorar la fotosíntesis en especies tolerantes y reducir la temperatura ambiental y de los paneles, aumentando su eficiencia (Amaducci *et al.*, 2018; Elamri *et al.*, 2018; Barron-Gafford *et al.*, 2019; Soto-Gómez, 2024; Ferrara *et al.*, 2023).

**CONSUMO DE AGUA:** El sombreado disminuye la transpiración, mejorando la eficiencia hídrica (Clandestino Muñoz, 2020; Willockx *et al.*, 2020b). Modelos como AVrain permiten optimizar la distribución de lluvia mediante inclinación de paneles (Elamri *et al.*, 2018), logrando reducciones del 20-40% en el consumo de agua en función del diseño y la gestión del sistema (Warmann *et al.*, 2024; Elamri *et al.*, 2018).

**EROSIÓN:** Aunque puede causar escorrentía localizada, la agrovoltaica también protege frente al estrés térmico, mejora la retención de humedad y puede enriquecer el contenido de carbono orgánico del suelo si se diseñan adecuadamente drenajes, barreras vegetales o estructuras integradas (Weselek *et al.*, 2021; Trommsdorff *et al.*, 2021; Pascaris *et al.*, 2022).

##### 1.4.2. IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA

**PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO DE LA TIERRA:** La agrovoltaica puede mejorar el rendimiento de algunos cultivos gracias a la reducción del estrés hídrico y térmico. Por ejemplo, el ají triplicó su producción bajo sombra parcial, y el tomate y jalapeño la duplicaron (Clandestino Muñoz, 2020). No obstante, cultivos como soja o arroz presentan reducciones de rendimiento bajo ciertas configuraciones (Disciglio *et al.*, 2023). La eficiencia del uso del terreno puede incrementarse hasta un 73% según la densidad de paneles (Dupraz *et al.*, 2011).

**SOMBREAMIENTO Y SUS EFECTOS:** El diseño de los sistemas (altura, orientación, densidad de paneles) determina la distribución de la radiación, afectando la fotosíntesis y la transpiración. El sombreado estimula adaptaciones morfológicas (hojas más grandes y delgadas, más clorofila) y cambios fisiológicos como menor conductancia estomática, lo que mejora la eficiencia del uso del agua (Willockx *et al.*, 2020a; Lee *et al.*, 2022; Elamri *et al.*, 2018; Disciglio *et al.*, 2023; Potenza *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2018).

La respuesta de los cultivos también depende de su tipo fotosintético. Los cultivos C3 (como arroz, patata o trigo) toleran mejor la sombra que los C4 (como maíz), lo que debe considerarse en el diseño del sistema (Willockx *et al.*, 2020a).

Esta respuesta de los cultivos a la sombra puede verse en la figura 4.

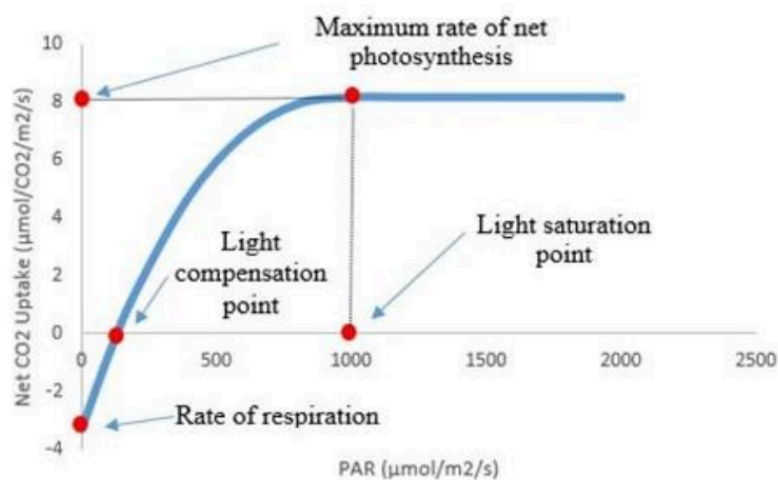


Figura 4. Curva de respuesta a la luz por parte de las plantas (Willockx *et al.*, 2020a).

La fotosíntesis sigue una respuesta escalonada frente a la luz. En una primera etapa, llamada fase de limitación lumínica, la tasa fotosintética aumenta proporcionalmente con la radiación disponible. Al superar un cierto umbral, se alcanza la fase de fotosaturación, donde otros factores como la concentración de CO<sub>2</sub> o la saturación de los centros de reacción limitan el proceso, y un aumento adicional de luz ya no mejora la fotosíntesis. Si la radiación continúa incrementándose, se entra en la fase de fotorespiración, donde parte de los compuestos generados se consumen, reduciendo la eficiencia fotosintética debido al exceso de luz.

En conjunto, la agrivoltaica ofrece una vía prometedora para hacer más sostenible y resiliente la producción agrícola, aunque requiere diseños personalizados y manejo adaptado a las condiciones locales y al tipo de cultivo.

## 1.5. INTERACCIÓN CON LA RADIACIÓN E ILUMINACIÓN

### 1.5.1. IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL.

La irradiancia horizontal global (GHI) anual es un factor clave en los proyectos de energía solar, ya que su medición y estimación están influenciadas por múltiples variables. Uno de los principales desafíos en su evaluación es la incertidumbre del ángulo de incidencia, el cual depende de la latitud y de la fracción de irradiación difusa, afectando significativamente la precisión de las mediciones (Brito *et al.*, 2022). Además, los efectos angulares del piranómetro pueden influir en la medición de la irradiancia tanto en superficies horizontales como inclinadas (Abella *et al.*, 2023).

Para obtener mediciones precisas del GHI, es fundamental considerar las coordenadas solares, la naturaleza espectral de la radiación solar y la configuración adecuada del equipo (Vignola *et al.*, 2012). Asimismo, la estimación de recursos solares a largo plazo es esencial en la planificación de proyectos, lo que requiere análisis estadísticos basados en series de datos de mediciones de campo (Cavaco *et al.*, 2016). Factores como la ubicación geográfica, la hora del día y la estación del año influyen en la variabilidad del GHI (Brito *et al.*, 2022). La comprensión de estos aspectos es crucial para una evaluación efectiva de los recursos solares y la selección óptima de emplazamientos para instalaciones fotovoltaicas.

En el caso de la agrivoltaica, la reducción de irradiancia solar puede afectar los cultivos. Por ejemplo, en sistemas de cultivo extensivo de trigo, la producción puede disminuir hasta un 6,1%, aunque el rendimiento conjunto de energía y biomasa puede incrementarse en un 22% (Wang *et al.*, 2019).

Los sistemas agrivoltaicos, que combinan paneles fotovoltaicos con la producción agrícola, modifican significativamente el microclima en entornos hortícolas. Se ha demostrado que estos sistemas pueden reducir la irradiancia horizontal global (GHI) hasta en un 42%, lo que conlleva una disminución de la evapotranspiración potencial y un aumento de la humedad del suelo (Jung *et al.*, 2024). Esta reducción de la radiación solar puede mitigar el estrés térmico y lumínico en los cultivos, favoreciendo su desarrollo y mejorando el rendimiento en especies como el tomate saladette (Velarde *et al.*, 2023).

El sombreado generado por los sistemas agrivoltaicos también puede generar sinergias económicas, ya que proporciona protección climática en regiones con alta irradiación (Jung *et al.*, 2021). No obstante, la distribución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y del GHI dentro de estos sistemas no es homogénea, lo que hace necesario el uso de modelos de alta resolución para evaluar con precisión el rendimiento de los cultivos, la evapotranspiración y la humedad del suelo (Campana *et al.*, 2022).

### 1.5.2. IRRADIANCIA DIFUSA HORIZONTAL ANUAL.

La irradiancia difusa horizontal anual tiene un impacto significativo en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, ya que cálculos inexactos pueden generar errores de hasta un 8% en las estimaciones de producción energética (Hofmann & Seckmeyer, 2017). La nubosidad influye directamente en la proporción de radiación solar directa y difusa, afectando la eficiencia del sistema (Veselinovic *et al.*, 2016).

Los modelos de radiación difusa anisotrópica, que consideran los brillos circumsolar y del horizonte, requieren modificaciones cuando se aplican a campos fotovoltaicos con varias filas de paneles, debido a la obstrucción parcial del cielo (Appelbaum *et al.*, 2019). Estas modificaciones incluyen el factor de vista del cielo, la corrección del brillo circumsolar y la corrección del brillo del horizonte. Para mejorar la precisión de las mediciones, se ha desarrollado un estándar de referencia para la irradiancia horizontal difusa de onda corta, basado en piranómetros bien caracterizados y en una técnica que emplea radiómetros de cavidad absoluta para la irradiancia directa de referencia (Michalsky J.J., 2007). Este estándar permite alcanzar una incertidumbre del 95% de confianza, con un margen de error de 2,2% de la lectura + 0,2 W/m<sup>2</sup>, proporcionando así mediciones más confiables y de baja incertidumbre.

En el ámbito de la agrivoltaica, la irradiancia difusa horizontal anual es un factor clave para predecir con precisión tanto el rendimiento de los cultivos como el desempeño del sistema fotovoltaico (Chalgynbayeva *et al.*, 2023). La radiación fotosintéticamente activa (PAR) indirecta es más eficiente que la PAR directa para la fotosíntesis en el dosel vegetal, lo que hace fundamental su estimación en evaluaciones agrivoltaicas (Ma *et al.*, 2022).

Los sistemas agrivoltaicos, que integran la producción agrícola y energética en un mismo terreno, han sido objeto de numerosas investigaciones, especialmente en la predicción del microclima y el rendimiento agrícola a corto plazo (Chalgynbayeva *et al.*, 2023). Un impacto fundamental de los paneles fotovoltaicos en estos sistemas es la modificación del microclima radiativo a nivel de cultivo, ya que la cantidad de sombra o luz que reciben las plantas se convierte en un indicador clave de su productividad.

Para evaluar con precisión los efectos del sombreado, los modelos 3D son herramientas esenciales, ya que permiten calcular con mayor exactitud la distribución de luz y sombra dentro del sistema agrovoltaico. Sin embargo, los resultados pueden variar significativamente dependiendo de la definición y los parámetros empleados, tales como la altura de los paneles, la porosidad del dosel vegetal y las condiciones climáticas (Garcin *et al.*, 2022).

### 1.5.3. ILUMINANCIA GLOBAL HORIZONTAL ANUAL.

La iluminancia global horizontal anual es una medida crucial de la disponibilidad de luz diurna, ya que influye directamente en el diseño de edificios y en la eficiencia energética. Esta varía considerablemente entre regiones, con áreas tropicales como Ciudad Ho Chi Minh, que experimentan niveles más altos y uniformes, en comparación con regiones como Moscú (Nguyen & Solovyov, 2018). La medición y predicción precisa de la iluminancia horizontal es esencial, y modelos como el IESNA son efectivos para la evaluación de estos datos (Shekari & Golmohammadi, 2009). La relación entre el brillo del cielo cenital y la iluminancia horizontal puede aproximarse mediante diferentes modelos que consideran diversas condiciones atmosféricas (Kocifai *et al.*, 2015).

Las tecnologías innovadoras de iluminación natural, como los tubos de luz horizontales, pueden aprovechar eficazmente esta iluminancia para mejorar las condiciones de iluminación interior en espacios profundos, proporcionando niveles constantes de iluminancia durante todo el año y, potencialmente, reduciendo el consumo de energía en períodos de alta demanda (Beltrán, 2023). Estos hallazgos destacan la importancia de tener en cuenta las variaciones regionales y las soluciones tecnológicas en el diseño de la iluminación natural.

En el campo de la agrivoltaica, la iluminancia global horizontal anual es crucial para evaluar el impacto de los paneles fotovoltaicos en el microclima de los cultivos. Afecta la distribución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la irradiancia global horizontal (GHI) a nivel de cultivo, lo cual es esencial para evaluar los balances energéticos y los rendimientos de los cultivos. El sombreado causado por los paneles crea condiciones de luz no homogéneas, lo que requiere un modelado de alta resolución para un análisis preciso (Campana *et al.*, 2022).

El diseño del sistema agrivoltaico influye significativamente en la homogeneidad de la luz y el rendimiento eléctrico, con configuraciones óptimas que varían según la ubicación (Kwon *et al.*, 2023). La definición precisa y los métodos de cálculo de las proporciones de sombreado son fundamentales, ya que los resultados pueden variar en función de factores como la altura del panel, la porosidad del dosel y las condiciones climáticas (Garcin *et al.*, 2022). Las tendencias recientes de investigación se centran en las predicciones a corto plazo y en diversos aspectos agrícolas, lo que pone de manifiesto la necesidad de contar con métodos de evaluación estandarizados en este campo en constante evolución (Chalgynbayeva *et al.*, 2023).

### 1.5.4. ILUMINANCIA DIFUSA HORIZONTAL ANUAL.

La iluminancia difusa horizontal anual es una medida crucial para evaluar la disponibilidad de luz diurna y sus efectos en los ambientes interiores. Esta se ve influenciada por diversos factores, como la orientación, las condiciones

atmosféricas y las variaciones estacionales (Mohelníková & Pelech, 2004). La medición y el modelado de la iluminancia horizontal global y difusa pueden proporcionar información valiosa para predecir las condiciones de luz diurna en distintos tipos de cielo (Kong & King, 2013). La relación entre el brillo del cielo cenital y la iluminancia horizontal varía según las condiciones atmosféricas, lo que requiere enfoques de conversión específicos (Kocifai *et al.*, 2015).

Al evaluar la exposición, las mediciones de iluminancia tanto horizontal como vertical son relevantes, ya que el campo visual humano suele estar orientado hacia abajo en la mayoría de los entornos (Sloney, 2019). Comprender estos aspectos es esencial para realizar evaluaciones precisas de la luz diurna en el diseño y rendimiento de los edificios, así como para estudiar los efectos de la luz artificial durante la noche (Mohelníková & Pelech, 2004; Kocifai *et al.*, 2015).

#### 1.5.5. PROMEDIO DE CIELOS NOCTURNOS, SOLEADOS Y NUBLADOS.

La frecuencia de las condiciones del cielo es un factor clave para optimizar la iluminación natural y el rendimiento de los sistemas de energía solar. Diversos estudios han analizado la distribución de estas condiciones utilizando distintos parámetros. En Japón, se ha estimado que, durante las horas de trabajo, el cielo está despejado el 5% del tiempo, intermedio el 70% y nublado el 25% (Nakamura *et al.*, 1985).

Para clasificar las condiciones del cielo, se emplean distintos métodos, como el índice de claridad (Teramoto & Escobedo, 2012), la iluminancia horizontal del cielo (Alshaibani, 2016) y parámetros climáticos comunes, tales como la nubosidad, las horas de sol y el índice de claridad (Li *et al.*, 2004). Entre ellos, se ha determinado que la nubosidad es el indicador más efectivo para clasificar el cielo (Li *et al.*, 2004). Estos estudios son fundamentales para desarrollar métodos de diseño de iluminación diurna más precisos, que reflejen con mayor fidelidad las condiciones atmosféricas reales.

En el contexto de la agrivoltaica, la variabilidad de las condiciones del cielo tiene un impacto directo en los efectos de sombra sobre los cultivos. Por ello, es crucial emplear modelos 3D precisos para calcular la distribución del sombreado, considerando factores como la altura del panel, la porosidad del dosel, la época del año y el clima, ya que todos ellos afectan significativamente los resultados (Garcin *et al.*, 2022). Estudios de campo han demostrado que ciertos cultivos, como la escarola, pueden beneficiarse de la sombra generada por los paneles fotovoltaicos, lo que se traduce en mayores rendimientos y una mejora del estado hídrico de las plantas (Prá *et al.*, 2023).

El diseño de sistemas agrivoltaicos debe buscar un equilibrio entre la producción de energía y las necesidades del cultivo, teniendo en cuenta la intensidad de la luz, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y los requerimientos hídricos (Zainol

Abidin *et al.*, 2021). Algunas estrategias ópticas permiten optimizar la exposición solar, proporcionando pleno sol en las primeras horas del día y sombra por la tarde, lo que favorece tanto el crecimiento de los cultivos como la generación de electricidad (Honsberg *et al.*, 2022).

Estos estudios destacan la relevancia de las condiciones del cielo en la investigación y aplicación de la agrivoltaica, evidenciando la necesidad de integrar estos factores en el diseño y optimización de los sistemas.

## 2. OBJETIVOS TRABAJO

### 2.1. OBJETIVOS GENERALES

Evaluar el efecto del sombreado provocado por las placas solares en sistemas agrivoltaicos sobre el crecimiento, desarrollo y calidad de plantas medicinales, aromáticas y hortícolas, mediante la medición de parámetros fisiológicos y bioquímicos, con el fin de optimizar el diseño y manejo de estos sistemas.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la eficiencia fotosintética mediante mediciones de fluorescencia de la clorofila.
2. Evaluar el contenido de clorofila en plantas bajo condiciones de pleno sol y sombra parcialmente.
3. Cuantificar el Índice de Área Foliar (LAI) y el Área Foliar Específica (SLA) utilizando un ceptómetro.
4. Realizar un análisis del suelo para caracterizar sus propiedades físico-químicas.
5. Obtener el peso fresco y seco de las plantas para evaluar su biomasa
6. Analizar la composición de aceites esenciales mediante cromatografías de gases.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 3.1. AREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACIÓN

El estudio se llevó a cabo en la localidad de Tabernas de Isuela (Huesca, España: 42°03'19"N 0°24'39"O), en una finca experimental que comprende dos zonas diferenciadas: una destinada al cultivo de especies hortícolas y otra a la producción de plantas aromáticas y medicinales.

En la Figura 5 podemos observar las filas cultivadas bajo una estructura cubierta con malla de sombreado de densidad uniforme, empleada para reducir la radiación solar incidente de forma homogénea sobre todos los cultivos.



Figura 5. Entorno de plantación y estructura de sombreo.

La zona experimental dedicada a los cultivos hortícolas abarca una superficie de 2 hectáreas (20.000 m<sup>2</sup>). En esta área, los paneles fotovoltaicos fueron reemplazados por lonas de sombreo, sujetas sobre una de las aguas del tejado de un antiguo invernadero. La estructura imita los sistemas de agrivoltaica con instalaciones fijas sobre los cultivos. Bajo él se han plantado las distintas especies vegetales en 5 filas, siguiendo una orientación Norte-Sur. Cada fila ocupa una superficie aproximada de 4.000 m<sup>2</sup>, distribuidos de forma lineal.

Por otro lado, la zona experimental dedicada a los cultivos aromáticos y medicinales cuenta con una superficie de 368 m<sup>2</sup> (0,0368 ha). Esta área se dividió en tres bloques que corresponden a tres parcelas experimentales con distintos tratamientos de sombreo. La parcela 1 se encuentra bajo sombra total, con un tratamiento de sombreo del 80%. La parcela 2 presenta un tratamiento de sombra parcial, donde la mitad de la superficie recibe sombra y la otra mitad está expuesta a la luz. Finalmente, la parcela 3 no cuenta con ningún tipo de sombreo, por lo que las plantas se desarrollan en condiciones de plena exposición solar.

## 3.2. GESTIÓN AGRONÓMICA

### 3.2.1. CULTIVOS HORTÍCOLAS

El manejo de los cultivos hortícolas se realizó bajo un enfoque convencional adaptado a la agricultura ecológica. Se procedió al laboreo del suelo a 30 cm de profundidad una semana antes de la plantación, seguido de la aplicación de compost. El riego se llevó a cabo mediante un sistema de goteo localizado con una frecuencia de tres días, adaptada a las necesidades hídricas de las plantas. El control de malas hierbas se realizó de forma manual, complementado con una capa de paja sobre el suelo para la retención de humedad y la protección de la

estructura edáfica. Para el control de plagas, se aplicó tierra de diatomeas, especialmente en las parcelas de acelga, para combatir caracoles.

En la tabla 2 se puede observar con más detalle la gestión agronómica que se llevó a cabo en cada cultivo.

Tabla 2. Datos de interés cultivos hortícolas (Com.per.).

Especie vegetal	Fecha siembra	Fecha cosecha	Gestión	Tratamiento
Puerro ( <i>Allium ampeloprasum</i> var. <i>porrum</i> )	15/7/23	5/12/23	Riego por goteo localizado y capa de paja en el suelo para control de malas hierbas, retención de la humedad y protección del suelo	Ninguno
Acelga ( <i>Beta vulgaris</i> L.)	15/7/23	5/12/23	Riego por goteo localizado y capa de paja en el suelo para control de malas hierbas, retención de la humedad y protección del suelo	Tierra de diatomeas
Borraja ( <i>Borago officinalis</i> L.)	15/7/23	5/12/23	Riego por goteo localizado y capa de paja en el suelo para control de malas hierbas, retención de la humedad y protección del suelo	Ninguno

### 3.2.2. CULTIVOS AROMÁTICOS Y MEDICINALES

La gestión agronómica de las plantas aromáticas y medicinales siguió el mismo enfoque de laboreo y enmienda orgánica que los cultivos hortícolas. El riego se implementó inicialmente para favorecer el establecimiento, siendo posteriormente suspendido. El control de malas hierbas se realizó manualmente, sin necesidad de aplicar acolchados. No fue necesario aplicar tratamientos fitosanitarios, ya que las especies presentaron una elevada resistencia natural frente a plagas y enfermedades.

### 3.3. MATERIAL VEGETAL

#### 3.3.1. MATERIAL VEGETAL HORTÍCOLAS

Se han tomado medidas de un total de 20 plantas por cada especie vegetal: acelga, borraja y puerro, las cuales fueron plantadas el 15/07/2023 y cosechadas el 05/12/2023. La plantación de los puerros se hizo de cepellón, pero no se separaron, como es habitual los 2-3 individuos por cepellón. Las acelgas tienen un aprovechamiento periódico de las hojas grandes y la borraja se plantó y tuvo un aprovechamiento puntual de hojas sueltas. En la Tabla 3 podemos observar los distintos estados de desarrollo de los cultivos.

Tabla 3. Estados fenológicos de acelga, puerro y borraja (Com.per.).

Estado fenológico	Acelga	Puerro	Borraja
Germinación	5-10 días	7-14 días	7-14 días
Crecimiento vegetativo	4-12 semanas	8-16 semanas	4-8 semanas
Formación órganos cosechables	8-16 semanas	12-24 semanas	8-12 semanas
Floración y fructificación	5-10 semanas	7-12 semanas	6-10 semanas
Maduración y senescencia	Variable (se cosecha antes)	Variable (baja calidad tras floración)	3-6 semanas

### 3.3.2. MATERIAL VEGETAL AROMÁTICAS Y MEDICINALES

En el caso de las plantas medicinales y aromáticas, se tomaron medidas de un total de 150 plantas por especie vegetal, con fechas de plantación y cosechado diferentes dependiendo de la especie. En la Tabla 4 se muestran con más detalle.

Tabla 4. Especies aromáticas y medicinales establecidas en el ensayo, con el número de plantas y fechas de plantación y recolección (Com.per.).

Especies	Plantas	Fecha de plantación	Fecha de recolección
Salvia ( <i>Salvia officinalis</i> L.)	150	10/3/23	8/5/23
Menta ( <i>Mentha rotundifolia</i> )	150	11/3/23	30/5/23
Orégano ( <i>Origanum vulgare</i> subsp. <i>Virens</i> )	150	12/3/23	31/5/23
Ajenjo ( <i>Artemisia absinthium</i> var. <i>candial</i> )	150	13/3/23	24/8/23

### 3.4. DATOS CLIMÁTICOS

Tabla 5. Medidas mensuales de climatología en 2023.

Mes	Temp Media (°C)	Temp Max (°C)	Temp Mínima (°C)	Hum Media (%)	Hum Máx (%)	Hum Mín(%)	Radiación (MJ/m2)	Precipitación (mm)
ENERO	3,65	17,8	-7,46	78,6	100	14,49	7,71	50,79
FEBRERO	4,39	19,93	-6,11	74,06	99,3	24,02	11,86	26,86
MARZO	10,78	25,01	-7,32	67,1	99,2	24,93	16,9	2,73
ABRIL	14,15	29,62	-2,9	59,57	97,9	7,57	22,26	3,13
MAYO	16,52	29,21	1,51	60,92	99,6	15,89	23,63	6,87
JUNIO	21,22	36,77	9,81	70,59	100	13,87	21,09	49,16
JULIO	24,9	41,43	10,62	60,54	100	19,29	24,29	24,53
AGOSTO	25,08	39,69	7,2	53,89	98,9	11,39	23,97	5,15
SEPTIEMBRE	20,47	32,67	7,41	70,13	100	24,05	16,1	36,88
OCTUBRE	16,92	32,81	4,33	74,89	100	27	10,44	56,54
NOVIEMBRE	10,06	21,94	-3,01	80,18	100	32,55	7,79	34,01
DICIEMBRE	5,64	17,8	-6,18	82,2	100	27,84	6,47	10,68

### 3.5. ANÁLISIS DEL SUELO

Se tomaron muestras de suelo en dos zonas diferentes de la parcela, una en la zona bajo sombreado y otra en la zona siempre iluminada, siguiendo un muestreo aleatorio. La profundidad de las muestras es de unos 30 cm. Los suelos muestran resultados parecidos. La zona de suelo bajo la influencia del sombreado presenta una textura franca, mientras que la zona sin este tratamiento muestra una textura franco-arcillosa. Según los análisis, el suelo es ligeramente alcalino, muy calcáreo, con una conductividad eléctrica no limitante, además de presentar unos niveles de pH altos en ambas muestras. Los niveles de materia orgánica son medio-bajos y la presencia de calizas activas ha creado condiciones clorosantes. En cuanto a los nutrientes, el análisis revela niveles normales de N-NO<sub>3</sub>, magnesio y sodio, bajos de fósforo, y elevados de potasio y calcio. Hay pequeños desequilibrios de algunos nutrientes y se detecta una deficiencia de magnesio, mientras que la presencia de microelementos es normal.

Los resultados completos del análisis se muestran en el Anejo IV.

En la Figura 6 se muestra el proceso de toma de muestras de suelo en la zona bajo sombreado mediante una barrena, siguiendo un protocolo de muestreo aleatorio a una profundidad aproximada de 30 cm. Esta metodología permitió obtener una muestra representativa del perfil edáfico para su posterior análisis físico-químico en laboratorio.



Figura 6. Toma de muestras de suelo con barrena cilíndrica para su posterior análisis fisicoquímico en laboratorio.

En la Figura 7 se representan ambas muestras de suelo sobre el triángulo textural del USDA, en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla obtenidos. El punto rojo corresponde a la muestra tomada en la zona bajo sombreado, clasificada como textura franco-arcillosa; mientras que el punto azul representa la muestra de la zona iluminada, cuya textura se clasifica como franca.

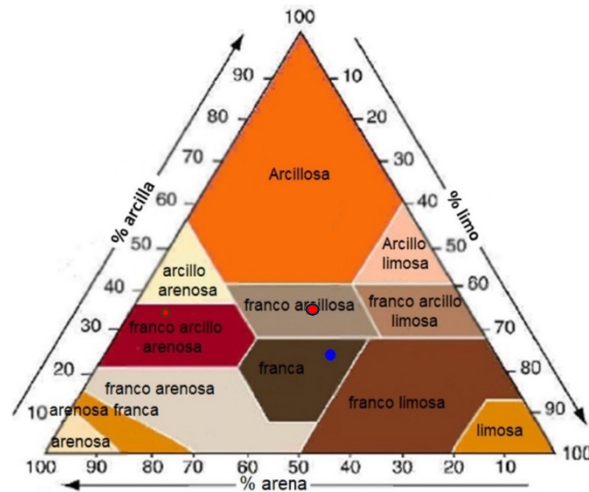


Figura 7. Análisis de textura de las muestras analizadas: zona siempre iluminada (azul) y zona de sombreado (rojo).

### 3.6. ANÁLISIS DEL AGUA

El suelo analizado presenta una textura franco-arcillosa y un espesor de 30 cm. Su pH es neutro (7) y la conductividad eléctrica (CE) es de 0,568 dS/m. En cuanto a la composición química, los niveles de nitratos alcanzan 4,11 mEq/l, mientras que los cloruros y sulfatos se encuentran en concentraciones de 0,0828 mEq/l y 0,12 mEq/l, respectivamente. El contenido de bicarbonatos es de 0,41 mEq/l.

Respecto a los cationes disueltos, el calcio registra un valor de 1,4 mEq/l, el magnesio 0,631 mEq/l, el potasio 2,18 mEq/l y el sodio 0,136 mEq/l. Por último, el nivel del agua subterránea se encuentra a más de 80 cm de profundidad.

### 3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el tratamiento estadístico de los datos, se emplearon diferentes enfoques en función de la naturaleza de las variables y el diseño experimental.

En primer lugar, para evaluar diferencias en los parámetros medidos entre tratamientos o filas, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. Este análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico se seleccionó por no requerir la asunción de normalidad en los datos ni homogeneidad de varianzas, condiciones que no siempre se cumplían en las variables analizadas. En aquellos casos donde el test de Kruskal-Wallis detectó diferencias significativas, se aplicó la prueba de Dunn como prueba post hoc, incorporando una corrección de Bonferroni para minimizar el riesgo de errores tipo I asociados a las comparaciones múltiples.

Adicionalmente, para el análisis de los parámetros fluorescentes obtenidos mediante fluorímetro, se llevó a cabo un análisis de varianza multivariante (MANOVA). Esta aproximación permitió evaluar de manera conjunta las diferencias en los valores de fluorescencia mínima ( $F_0$ ) y fluorescencia máxima ( $F_m$ ) entre las filas del invernadero. Estos dos parámetros se seleccionaron por ser medidas fundamentales e independientes dentro de la fluorescencia clorofílica, en contraste con otros índices derivados (como  $F_v$ ,  $F_0/F_m$  o  $\Phi(P_0)$ ) que no cumplían los supuestos de independencia requeridos para el análisis multivariante.

Como estadístico multivariante se utilizó el test de Pillai's Trace, debido a su mayor robustez frente a violaciones de la homogeneidad de matrices de covarianzas. Finalmente, se realizaron análisis univariados independientes sobre  $F_0$  y  $F_m$  para complementar la interpretación de los resultados en aquellos casos donde fuese necesario.

Todos los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de significancia del 5% ( $p < 0,05$ ).

### 3.8. MÉTODOS DE MEDIDA

#### 3.8.1. SPAD

Las medidas del contenido de clorofila en las hojas se llevaron a cabo en este ensayo mediante la utilización del medidor de clorofila SPAD-502 Plus (MINOLTA) de esta manera se evaluó de forma rápida y sencilla el contenido dinámico de clorofila en las hojas en función de la incidencia del sol, sin llegar a dañarlas. El contenido de clorofila es uno de los indicadores de salud de las plantas. Las medidas son adimensionales, pero están correlacionadas con el contenido de

clorofila. Los valores de SPAD se midieron en 4 hojas, dos medidas por hoja, de 4 plantas distintas sucesivas para cada fila, sometidas a diferente tratamiento para obtener un valor medio representativo. El tiempo entre repetición y repetición fue de una hora.

En la Figura 8 se muestra la utilización del medidor SPAD-502 Plus, empleado para registrar el índice relativo de clorofila en las hojas de las distintas especies cultivadas. En la imagen se observa una de las lecturas tomadas directamente sobre una hoja de acelga en campo.



Figura 8. Medición del índice SPAD en hojas de acelga mediante clorofilómetro SPAD-502Plus (MINOLTA).

### 3.8.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (LAI) E INTERCEPTACIÓN DE LUZ (TAU)

Se mide con el ceptómetro LP-80 (METER). Permitirá conocer tanto el Índice del Área Foliar (LAI) como la Interceptación de luz (TAU). El LAI se define como el área de hojas por unidad de área de superficie del suelo. Y la TAU, que es la relación entre las mediciones de PAR por debajo del dosel de hojas respecto a las mediciones de PAR por encima del dosel de hojas se manifiesta como un porcentaje. Ello se realiza midiendo la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) que es la cantidad de radiación de las longitudes de onda que producen la fotosíntesis. Son longitudes de onda entre 400 y 700 nm.

El LAI es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación, para ayudar a evaluar la densidad y biomasa de la cubierta.

Las medidas del ceptómetro se tomaron cada cierto tiempo y se repetía periódicamente 20 medidas en cada una de las especies, realizando 5 repeticiones por cultivo. Con esos datos se pueden calcular otros parámetros como la masa seca foliar (cm<sup>2</sup>/g). En este estudio se trabajarán los datos utilizando los parámetros TAU y el Índice de Área Foliar (LAI).

En la Figura 9 se aprecia la toma de mediciones en campo con el ceptómetro LP-80 entre las filas de acelga, bajo la estructura de sombreo. La imagen refleja el procedimiento habitual durante el ensayo para obtener los valores necesarios para el cálculo del índice de área foliar (LAI) y la interceptación de luz (TAU).



*Figura 9. Medición de la radiación en el cultivo de acelga mediante ceptómetro AccuPAR LP-80 (METER).*

### 3.8.3. FLUORÍMETRO

La fluorescencia clorofílica es un fenómeno en el que ciertas moléculas, tras absorber luz, emiten una pequeña cantidad de energía en forma de luz de mayor longitud de onda. Este proceso está relacionado con la excitación y retorno de electrones en la clorofila, y su medición permite evaluar el funcionamiento de los centros de reacción fotosintéticos y detectar posibles situaciones de estrés en la planta.

En este estudio, las mediciones se realizaron únicamente en acelga y puerro, con una repetición por cultivo. Se utilizó un fluorómetro Handy PEA+ (HANSATECH) para registrar los niveles de fluorescencia. En cada especie se midieron dos hojas de dos plantas distintas por fila, obteniendo un total de 40 valores por cultivo. Posteriormente, se calculó la media por planta para obtener un valor representativo de cada fila. Las mediciones se llevaron a cabo el 20 de diciembre.

En las Figuras 10 se muestra el proceso de medición de la fluorescencia en campo, aplicado sobre las hojas de acelga (a) y puerro (b). Las mediciones se tomaron tras un periodo de adaptación de las plantas a las condiciones de sombreo, siguiendo el protocolo establecido.



Figura 10:(a) Determinación del estado fisiológico de acelga mediante fluorímetro portátil Handy-Pea+ (HANSATECH); b) Medición en puerro con el mismo equipo para evaluar la fluorescencia cloroflica.

### 3.9. PRODUCCIÓN Y PESOS

El día de la visita de campo se realizó la recolección de plantas de cada una de las filas para posteriormente pesar por un lado las hojas individuales de la acelga y por otro lado, las plantas de puerro. Más tarde se pesaron en el laboratorio y se metieron en la estufa a 65°C para obtener el peso seco de cada muestra. El resto de las plantas fueron recogidas por la propiedad los días posteriores.

Conviene destacar que no se pudo obtener el peso completo de las plantas de acelga debido a que se realizó un aprovechamiento por hojas cortadas que no fueron pesadas para el ensayo.

En la Figura 11 se observa material vegetal de puerro preparado para su análisis en laboratorio. Las plantas fueron etiquetadas y pesadas antes de ser introducidas en la estufa para determinar su contenido en materia seca.



Figura 11. Ejemplares de puerro cosechados para la determinación de su peso fresco y seco.

### 3.10. CULTIVOS AROMÁTICOS Y MEDICINALES

Con el objetivo de evaluar el rendimiento y la composición de los aceites esenciales de las plantas aromáticas estudiadas, se llevó a cabo un ensayo entre los años 2022 y 2024. Durante este periodo, se cultivaron y recolectaron cuatro especies: salvia, orégano, menta y ajeno, bajo tres condiciones de tratamiento lumínico: soleado, sombra y sombra-soleado.

Las imágenes representativas de cada cultivo y tratamiento se recogen en el Anejo III (Figuras de la 8-11).

La biomasa fresca recolectada fue sometida a un protocolo homogéneo de secado, destilación y posterior análisis, con el fin de cuantificar el rendimiento en aceites esenciales y caracterizar su composición química.

A continuación, se describen los procedimientos empleados para la extracción y análisis de los aceites esenciales:

#### 3.10.1.DESTILACIÓN

Para la extracción de aceites esenciales, las muestras vegetales fueron fraccionadas utilizando una guillotina, facilitando su manipulación y su adecuada introducción en los matraces de destilación. Cada muestra se sometió a tres ensayos independientes, empleando tres matraces distintos. Se separaron 100 g de material vegetal troceado por matraz y se añadieron 1 L de agua destilada, manteniendo esta proporción constante en todos los ensayos conforme a un protocolo estandarizado.

El proceso de extracción se realizó mediante destilación por arrastre de vapor en un sistema de calentamiento controlado a 100 °C. El sistema contaba con tres vías para la recirculación del vapor y un sistema de refrigeración basado en la circulación de agua fría desde una fuente externa.

El vapor de agua cargado con el aceite esencial ascendía hacia un sistema de condensación de doble tubo, donde se enfriaba y se producía la separación del aceite esencial del agua condensada. El aceite recolectado se extrajo mediante micropipeteo y se almacenó en frascos de vidrio para su posterior análisis.

La eficiencia del proceso se cuantificó aproximadamente en 1 mL de aceite esencial por cada litro de agua destilada utilizado.

En la Figura 12 se observa el montaje de laboratorio para la destilación por arrastre de vapor y la preparación previa del material vegetal, etapas clave para la obtención de aceites esenciales.



*Figura 12. Proceso de preparación para la elaboración de aceite esencial de ajeno.*

### 3.10.2. CROMATOGRAFÍAS

Las muestras de aceite esencial obtenidas tras el proceso de destilación fueron enviadas a un laboratorio especializado para su análisis.

El objetivo del análisis fue identificar y cuantificar los compuestos mayoritarios presentes en cada uno de los aceites esenciales obtenidos de las diferentes especies y tratamientos.

Se emplearon métodos estandarizados de inyección de muestras y detección cromatográfica, garantizando la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados.

La caracterización detallada de los compuestos detectados y sus proporciones relativas se expone en el apartado de Resultados y en el Anejo I (tablas 1-4).

### 3.11. SIMULACIONES

Con el objetivo de complementar los resultados obtenidos en campo, se realizaron simulaciones mediante herramientas digitales que permiten modelizar el comportamiento de un sistema agrivoltaico y analizar el impacto de la sombra generada por los paneles solares en las condiciones microclimáticas del cultivo.

Para el diseño tridimensional de la instalación se utilizó SketchUp 2024, junto con la extensión Skelion, que permite la disposición automática de paneles solares y el cálculo de la reducción de radiación incidente sobre el cultivo (Figura 17b).

La simulación del crecimiento y rendimiento del cultivo se llevó a cabo con el modelo agrihidrológico AquaCrop 7.1 (FAO), utilizando datos meteorológicos diarios procedentes de la estación de Huesca (AEMET) y aplicando los coeficientes de reducción de la radiación obtenidos en SketchUp.

Se compararon dos escenarios: con sombreado (paneles instalados) y sin sombreado, con el fin de evaluar diferencias en la producción de biomasa y la eficiencia del agua.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. CEPTÓMETRO

#### 4.1.1. BORRAJA.

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de la borraja se muestran en el Anejo B (véase Figura B.1).

El parámetro Tau del cultivo de la borraja (Figura 13), se puede observar que a las 10:30 los valores son bastante similares, mientras que a mediodía (12:30 y 13:30) aparecen diferencias notables entre filas. Las filas con valores de Tau (T) más bajos reflejan una mayor incidencia de sombra, evidenciando el efecto heterogéneo del sombreado por los paneles agrivoltaicos sobre la radiación disponible para la planta.

Por otro lado, se observa que en la Figura 14, mientras en las primeras horas los valores son homogéneos, al mediodía algunas filas muestran un LAI notablemente inferior, lo que indica que el sombreado de los paneles agrivoltaicos reduce la captación de luz en esas zonas y, en consecuencia, la densidad foliar.

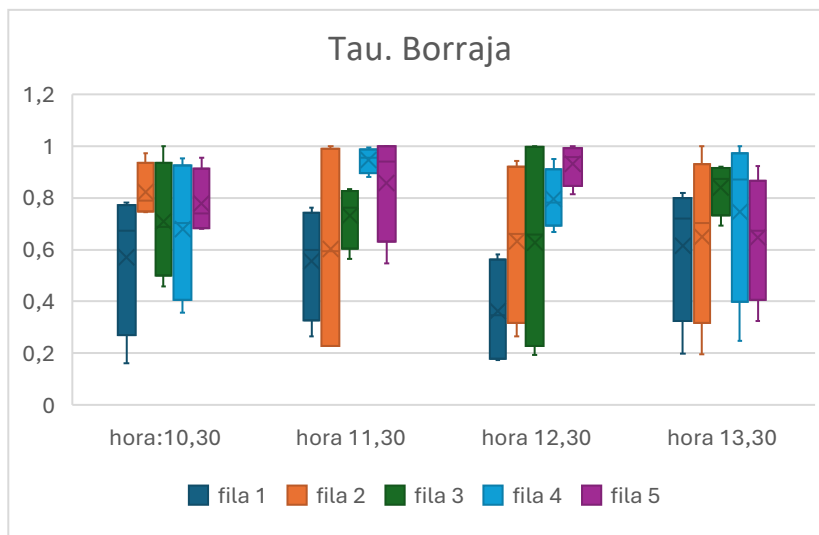


Figura 13. Valor del parámetro Tau (T) en el cultivo de la borraja a lo largo de las cuatro horas de medición y las distintas filas.

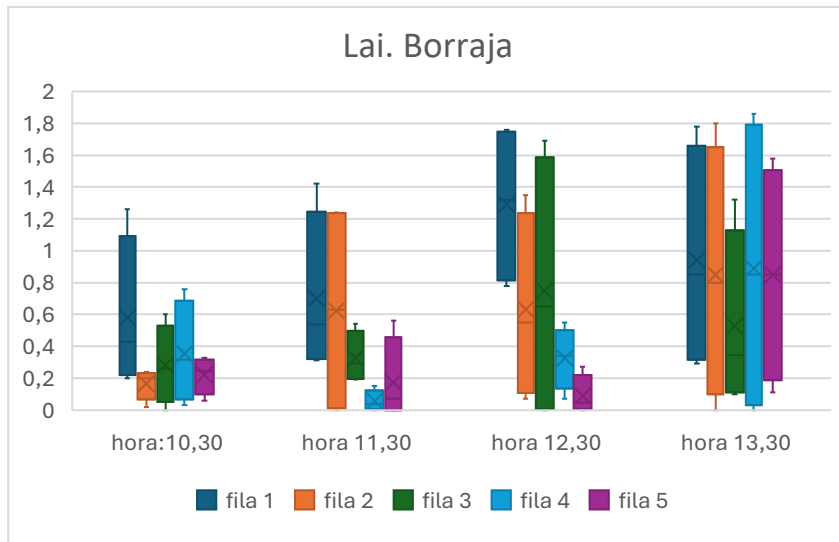


Figura 14. Evolución del parámetro LAI a lo largo de las horas y en las distintas filas.

Los resultados muestran que el parámetro Tau (T) (Figura 15) es menor en la zona inferior del cultivo, evidenciando el efecto del sombreado parcial. Las diferencias entre filas indican una distribución heterogénea de la radiación, asociada a la orientación respecto a los paneles agrivoltaicos.

De forma similar, el índice de área foliar (LAI) (Figura 16) presenta valores más altos en la parte superior, donde la luz es más abundante, y menores en zonas sombreadas. Esta variabilidad refleja la influencia del microambiente en la estructura foliar y el desarrollo del cultivo bajo condiciones de sombra.

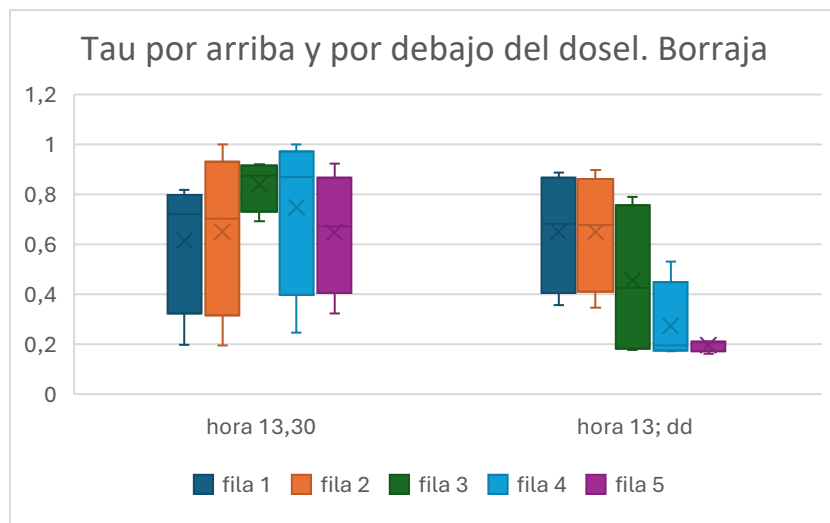


Figura 15. Distribución del parámetro Tau, medido por arriba y por debajo del dosel, para el cultivo de la borraja.

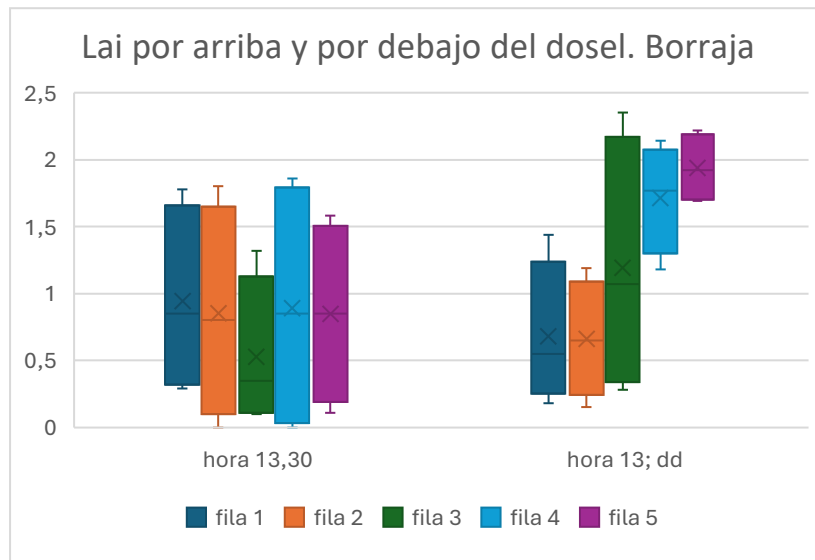


Figura 16. Valores del índice de área foliar (LAI), medidos en la parte superior e inferior del cultivo, para el cultivo de la borraja.

El test no paramétrico de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticamente en los valores de Tau (T) ( $p < 0,05$ ) según la franja horaria. Los resultados, incluyendo el análisis post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni, se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro Tau (T) del cultivo de la borraja.

Prueba de Kruskal-Wallis [TAU]				
K (valor observado)	13,368			
K (valor crítico)	9,488			
GL	4			
p-valor (unilateral)	0,009612			
alfa	0,05			
Muestra	Frecuencia	Suma-rangos	Media-rangos	Grupos
hora 13;dd	20	599	30	A
hora 12:30	20	1070	53,5	A B
hora 10:30	20	1074	53,7	A B
hora 13:30	20	1094	54,7	A B
hora 11:30	20	1213	60,6	B

En el caso del índice LAI, también se detectaron diferencias significativas entre horarios ( $p < 0,05$ ). La Tabla 7 muestra los resultados detallados.

Tabla 7. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro LAI del cultivo de la borraja.

Prueba de Kruskal-Wallis [LAI]				
K (valor observado)	21,008			
K (valor crítico)	9,488			
GL	4			
p-valor (unilateral)	0,00032			
alfa	0,05			
Muestra	Frecuencia	Suma-rangos	Media-rangos	Grupos
hora 11:30	20	738	36,9	B
hora 10:30	20	772	38,6	B
hora 12:30	20	956	47,8	B
hora 13:30	20	1120	56	A B
hora 13;dd	20	1466	73,3	A

#### 4.1.2. PUERRO

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo del puerro se muestran en el Anejo B (véase Figura B.2).

Los valores del parámetro Tau (T) recogido en la Figura 17, se puede observar que a las 10:30 los valores son relativamente homogéneos entre filas, pero a medida que avanza el día, especialmente a las 12:30 y 13:30, se observan diferencias significativas. Las filas con valores de Tau (T) más bajos indican una mayor incidencia de sombra, lo que sugiere que la posición relativa a los paneles agrivoltaicos influye en la cantidad de radiación que reciben los puerros, afectando potencialmente su eficiencia fotosintética y crecimiento.

Por otro lado, en la Figura 18, se observa que, a primeras horas, los valores son homogéneos entre filas; sin embargo, a mediodía se evidencian diferencias notables, con algunas filas mostrando LAI inferior. Esto sugiere que la incidencia de sombra, posiblemente generada por los paneles agrivoltaicos, reduce la densidad foliar en ciertas posiciones. La distribución heterogénea de la radiación podría afectar la eficiencia fotosintética y el crecimiento del cultivo.

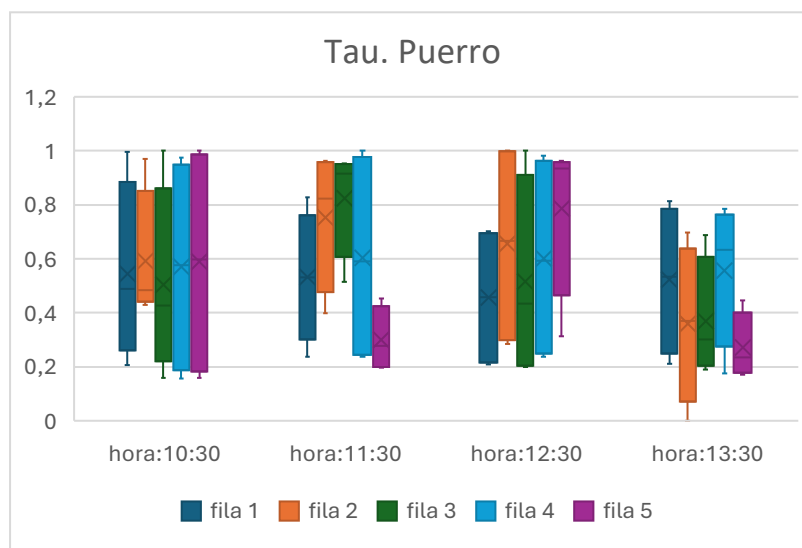


Figura 17. Valor del parámetro Tau (T) en el cultivo del puerro a lo largo de las cuatro horas de medición y las distintas filas.

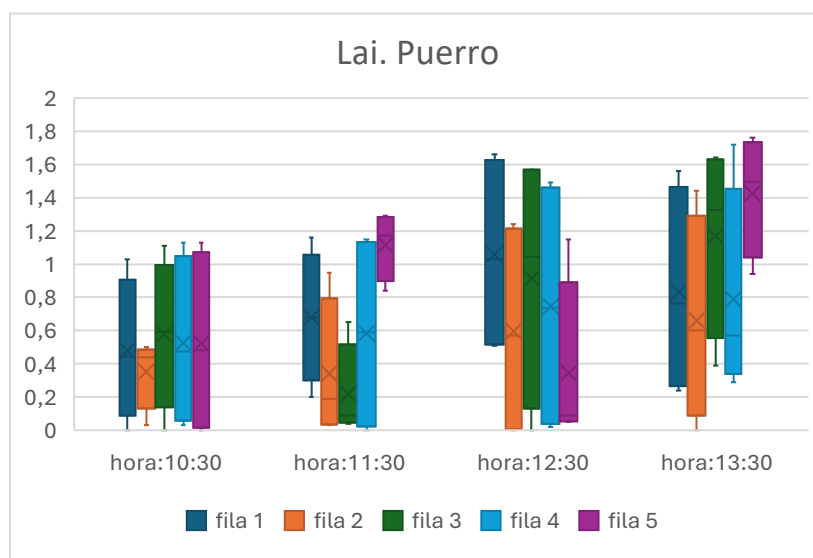


Figura 18. Evolución del parámetro LAI a lo largo de las horas y las distintas filas.

En general, se registran valores del parámetro Tau (T) (Figura 19) inferiores en la parte baja del cultivo, lo que refleja la atenuación de la radiación por efecto de la densidad foliar y el sombreado inducido por los paneles agrivoltaicos. Las diferencias entre filas evidencian que la posición relativa respecto a los paneles condiciona la cantidad de luz que alcanza los estratos inferiores, lo cual puede afectar la eficiencia fotosintética y el desarrollo del puerro.

Por otro lado, se observa un valor de LAI (Figura 20) más elevado en la parte superior del cultivo, lo que indica una mayor densidad foliar en las zonas con mayor disponibilidad lumínica. Las diferencias entre filas sugieren que la ubicación relativa a los paneles agrivoltaicos modula la cantidad de radiación incidente, condicionando así el desarrollo foliar del cultivo.

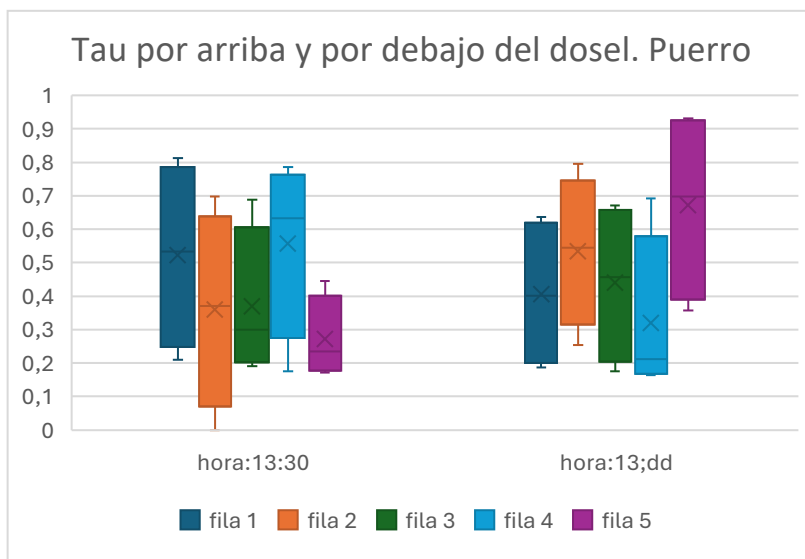


Figura 19. Distribución del parámetro Tau, medido por arriba y por debajo del dosel, para el cultivo del puerro.

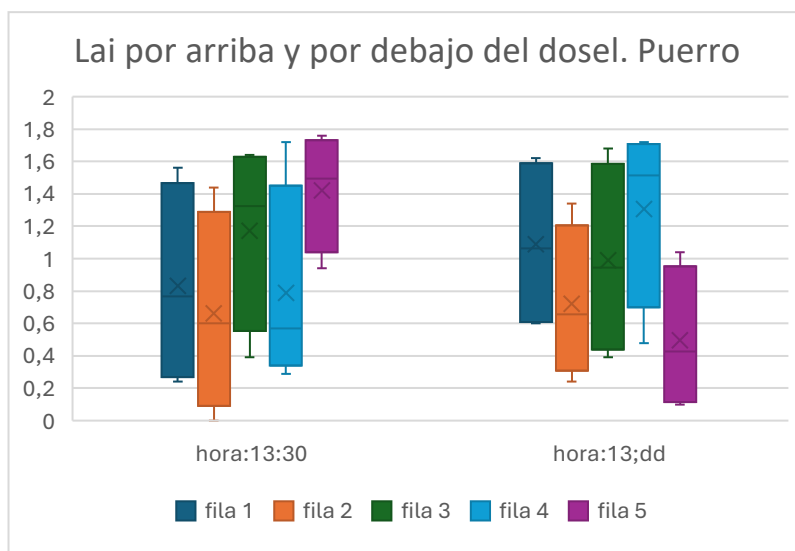


Figura 20. Valores del índice de área foliar (LAI), medidos en la parte superior e inferior del cultivo, para el cultivo del puerro.

El test no paramétrico de Kruskal-Wallis reveló que no había diferencias estadísticamente significativas en los valores de Tau (T) entre las franjas horarias ( $p=0,1061 > 0,05$ ). Estos resultados indican que la variabilidad observada entre horarios no es suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad entre grupos.

El comportamiento del LAI en cambio, varió en función del horario, alcanzando diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ). Los contrastes por pares, recogidos en la Tabla 8, identifican grupos estadísticamente distintos y otros con respuestas similares.

Tabla 8. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro LAI del cultivo del puerro.

Prueba de Kruskal-Wallis [LAI]				
K (valor observado)	12,186			
K (valor crítico)	9,488			
GL	4			
p-valor (unilateral)	0,1061			
alfa	0,05			
Muestra	Frecuencia	Suma-rangos	Media-rangos	Grupos
hora 10:30	20	698	34,9	A
hora 11:30	20	856	42,8	AB
hora 12:30	20	1124	56,2	AB
hora 13:30	20	1124	56,2	AB
hora 13;dd	20	1248	62,4	B

#### 4.1.3. ACELGA

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de la acelga se muestran en el Anejo B (véase Figura B.3).

En la Figura 21, podemos observar que a las 10:30, los valores de Tau (T) son más elevados y similares entre filas, lo que refleja una mayor uniformidad en la transmitancia. Conforme avanza el día, especialmente a las 12:30 y 13:30, se acentúan las diferencias entre filas, probablemente debido al sombreado desigual provocado por la posición respecto a los paneles agrivoltaicos. Esta variabilidad puede influir en la disponibilidad de luz para la fotosíntesis y, en consecuencia, en el desarrollo de la acelga.

En el caso del índice de área foliar (LAI) de la Figura 22, a las 10:30, los valores son bajos y presentan diferencias moderadas entre filas. Conforme avanza el día, algunas filas muestran un incremento notable, mientras que otras mantienen valores reducidos. Esta variabilidad indica una influencia diferencial del sombreado según la posición respecto a los paneles agrivoltaicos, afectando la disponibilidad lumínica y, en consecuencia, la densidad foliar. Las mayores discrepancias se observan a mediodía (12:30 y 13:30), coincidiendo con un sombreado más acusado y heterogéneo.

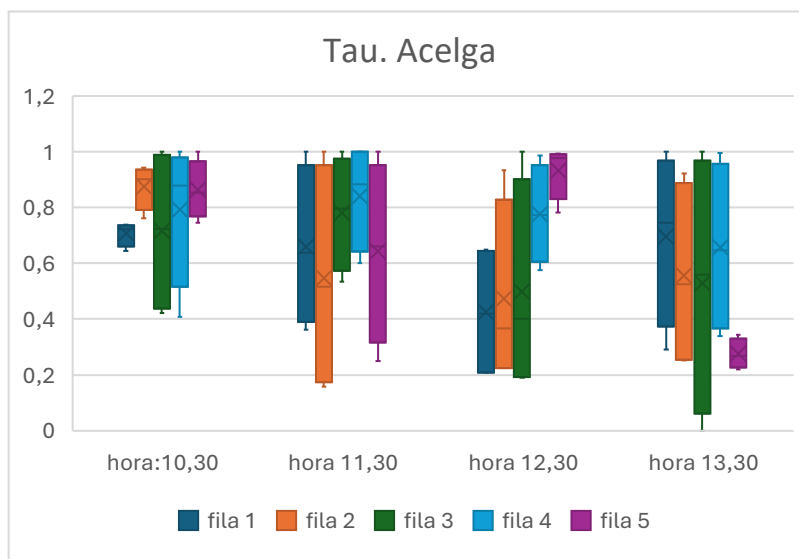


Figura 21. Valor del parámetro Tau (T) en el cultivo de la acelga a lo largo de las cuatro horas de medición y las distintas filas.

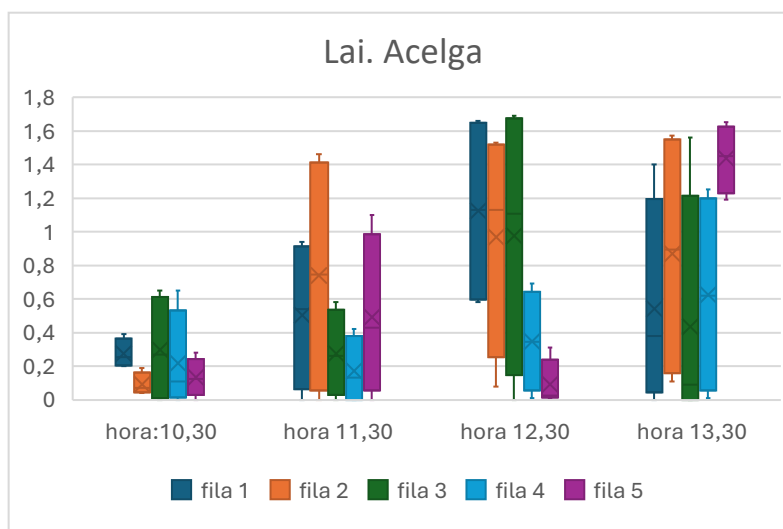


Figura 22. Evolución del parámetro LAI a lo largo de las horas y las distintas filas.

Se observa que los valores de Tau (Figura 23) en la zona inferior del cultivo tienden a ser menores, lo que indica una reducción en la transmisión de luz hacia las partes bajas del dosel. Las diferencias entre filas reflejan cómo la disposición de cada una respecto a los paneles agrivoltaicos condiciona la distribución vertical de la radiación, lo cual puede influir en la eficiencia fotosintética y el desarrollo fisiológico de la acelga.

En cuanto al índice de área foliar (LAI) (Figura 24), los valores son, por lo general, superiores en la parte alta del cultivo, lo que refleja una mayor densidad foliar en zonas con mayor disponibilidad lumínica. Las diferencias entre filas evidencian el efecto de la posición relativa frente a los paneles agrivoltaicos sobre la arquitectura

del dosel, indicando una distribución heterogénea de la radiación incidente y su impacto en el desarrollo de la acelga.

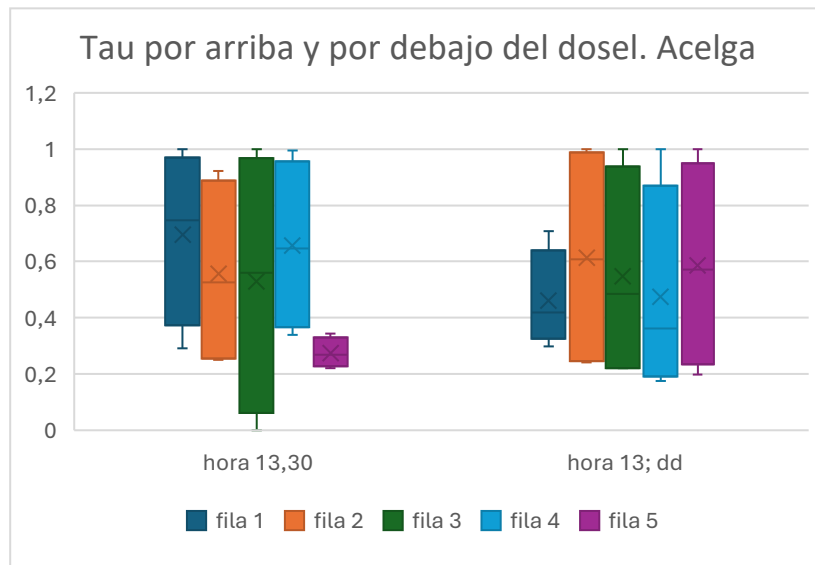


Figura 23. Distribución del parámetro Tau, medido por arriba y por debajo del dosel, para el cultivo de la acelga.

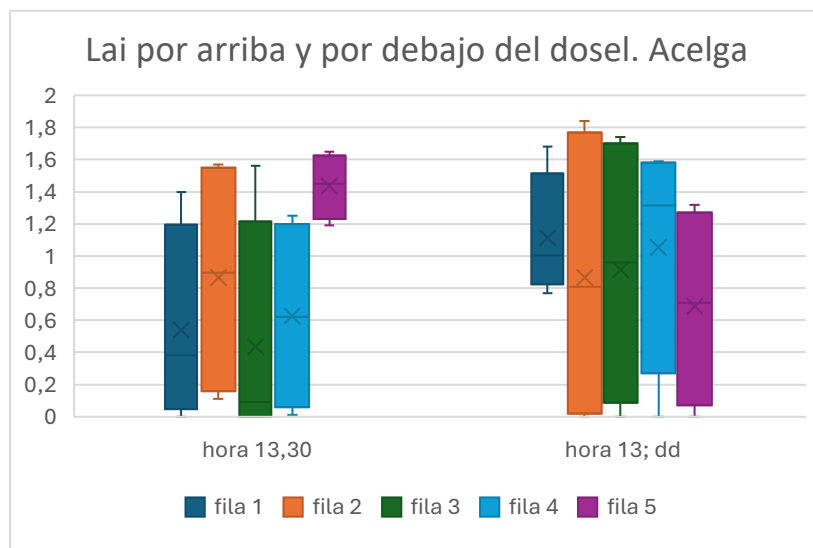


Figura 24. Valores del índice de área foliar (LAI), medidos en la parte superior e inferior del cultivo, para el cultivo de la acelga.

La prueba de Kruskal-Wallis no mostró diferencias estadísticamente significativas en los valores de Tau (T) entre las franjas horarias ( $p= 0,1061 > 0,05$ ), indicando que la variabilidad entre horarios no es suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad entre grupos.

Los resultados obtenidos para el LAI sí mostraron diferencias horarias significativas. El análisis por rangos y los grupos homogéneos están reflejados en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para el parámetro LAI del cultivo de la acelga.

Prueba de Kruskal-Wallis [LAI]				
K (valor observado)	12,186			
K (valor crítico)	9,488			
GL	4			
p-valor (unilateral)	0,1061			
alfa	0,05			
Muestra	Frecuencia	Suma-rangos	Media-rangos	Grupos
hora 10:30	20	698	34,9	A
hora 11:30	20	856	42,8	AB
hora 12:30	20	1124	56,2	AB
hora 13:30	20	1124	56,2	AB
hora 13;dd	20	1248	62,4	B

## 4.2. SPAD

### 4.2.1. BORRAJA

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de la borraja se muestran en el Anejo B (véase Figura B.4).

Los valores de SPAD, cuyo rango comienza en 30, muestran una variabilidad notable entre filas, como se observa en la Figura 25: algunas presentan contenidos de clorofila más elevados, mientras que otras registran valores inferiores. Estas diferencias, especialmente evidentes entre las 11:00 y las 12:30, podrían estar relacionadas con la intensidad de la radiación solar y el efecto de sombreado provocado por los paneles agrivoltaicos, lo que influiría en la capacidad fotosintética y, potencialmente, en el rendimiento de la borraja.

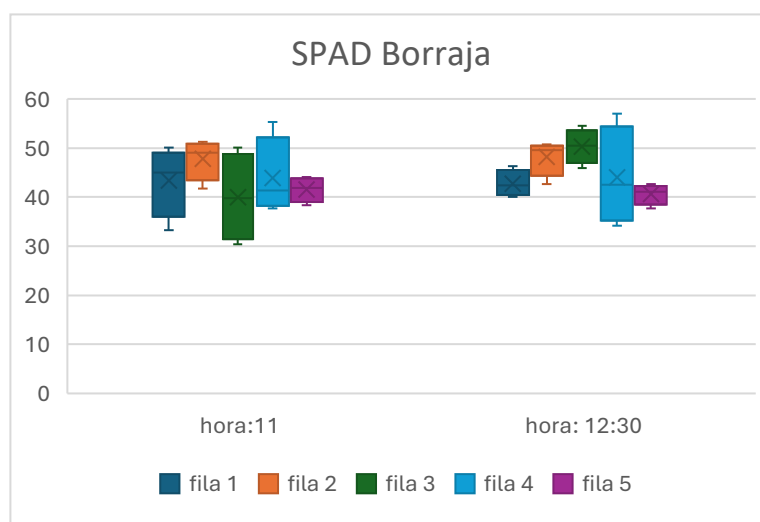


Figura 25. Valores SPAD para el cultivo de la borraja.

La prueba de Kruskal-Wallis no evidenció diferencias estadísticamente significativas en los valores de SPAD entre los grupos evaluados ( $p=0,4327>0,05$ ), lo que indica que no se detectaron contrastes globales relevantes. También se observa una cierta variabilidad entre grupos, aunque no suficiente desde el punto de vista estadístico, respaldando la hipótesis nula de igualdad y sugiriendo que las diferencias observadas podrían deberse al azar o a una variabilidad natural no asociada a los tratamientos realizados.

#### 4.2.2. PUERRO

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo del puerro se muestran en el Anejo (véase Figura B.5).

Los valores de SPAD, cuyo rango comienza en 40, mostrados en la Figura 26 para el cultivo de puerro presentan variaciones entre filas en cada franja horaria, con algunas mostrando niveles más altos, indicativos de un mayor contenido de clorofila, y otras registrando valores más bajos. El cambio apreciado entre las 11:00 y las 12:30 podría estar asociado a la variación en la intensidad de la radiación solar y al efecto de sombreado generado por los paneles agrivoltaicos. Estas diferencias reflejan una posible heterogeneidad en la capacidad fotosintética del cultivo, influida por la posición de las filas y las condiciones microclimáticas derivadas del sistema agrivoltaico.

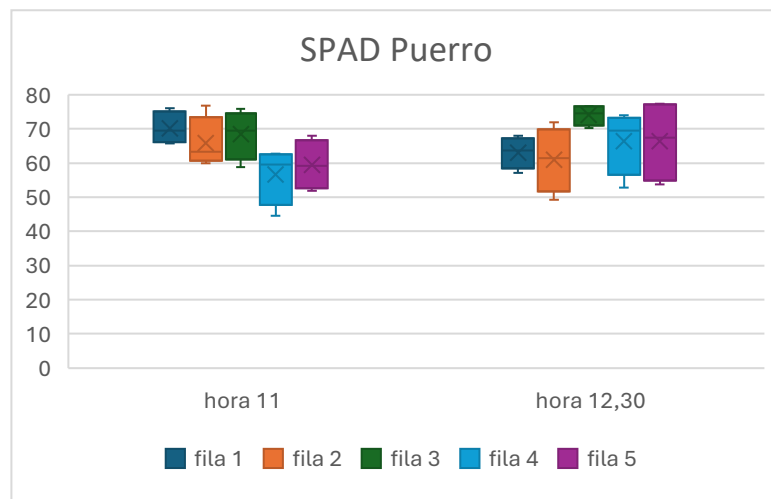


Figura 26. Valores SPAD para el cultivo del puerro.

La prueba de Kruskal-Wallis no reveló diferencias estadísticamente significativas en los valores de SPAD entre los grupos evaluados ( $p=0,3867>0,05$ ), lo que indica que no se detectaron contrastes globales relevantes. En conjunto, los datos sugieren que la variabilidad observada entre grupos no es lo suficientemente consistente como para rechazar la hipótesis nula de igualdad, lo cual podría

deberse a una respuesta homogénea del cultivo o a una influencia limitada de los factores evaluados en este parámetro.

#### 4.2.3. ACELGA

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de la acelga se muestran en el Anejo B (véase Figura B.6).

Tal como se observa en la Figura 27, a las 11:00 los valores de SPAD, cuyo rango comienza en 10, tienden a ser más elevados y presentan una mayor dispersión entre filas, mientras que a las 12:30 se registra una disminución generalizada. Esta variación podría estar relacionada con el incremento progresivo de la radiación solar y la temperatura a lo largo de la mañana, junto con el efecto de sombreado generado por los paneles agrivoltaicos. Ambos factores afectan la síntesis de clorofila y, en consecuencia, la capacidad fotosintética del cultivo, lo que explicaría las diferencias observadas entre filas.

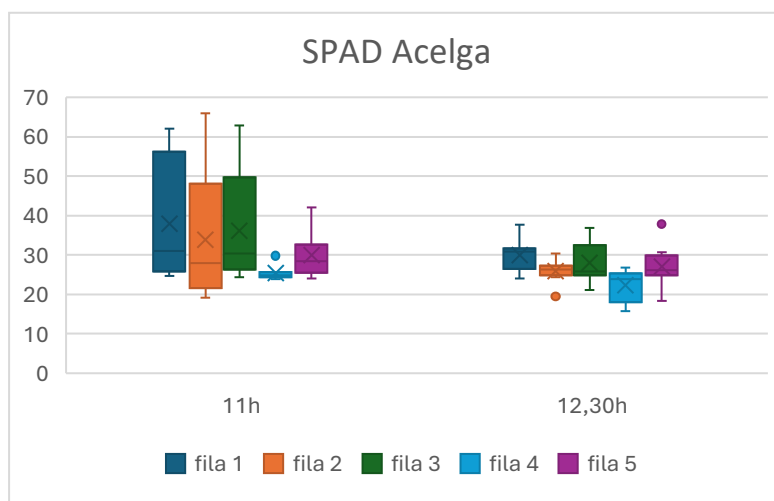


Figura 27. Valores SPAD para el cultivo de la acelga.

La prueba de Kruskal-Wallis no mostró diferencias estadísticamente significativas en los valores de SPAD entre los grupos evaluados ( $p=0,1028 > 0,05$ ), lo que indica que no se identificaron contrastes globales relevantes. En conjunto, los datos sugieren que, aunque existe cierta variabilidad entre grupos, esta no es suficientemente consistente desde el punto de vista estadístico como para rechazar la hipótesis nula de igualdad. Es posible que las diferencias observadas se deban a la variabilidad natural del sistema o a la limitada influencia de los factores evaluados sobre este parámetro.

#### 4.3. FLUORÍMETRO

##### 4.3.1. PUERRO

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de la borraja se muestran en el Anejo B (véase Figura B.7).

Se llevó a cabo un análisis de varianza multivariante (MANOVA) con el objetivo de evaluar si existían diferencias conjuntas en los valores de fluorescencia mínima (Fo) y máxima (Fm) entre las cinco filas del invernadero. Estos dos parámetros se seleccionaron específicamente para el análisis multivariante por tratarse de medidas fundamentales e independientes dentro de la fluorescencia clorofílica, a diferencia de otros parámetros derivados (como Fv, Fo/Fm, Fv/Fm o Phi(Po)), que están directamente calculados a partir de ellos y, por tanto, no cumplían los supuestos de independencia requeridos por la prueba.

El test de Pillai's Trace no reveló diferencias estadísticamente significativas entre grupos (Pillai = 0,188;  $p = 0,536 > 0,05$ ), lo que indica que la posición de las filas dentro del invernadero no tuvo un efecto multivariado relevante sobre estos dos parámetros. En línea con estos resultados, tampoco se observaron diferencias significativas cuando Fo y Fm se analizaron por separado, lo que sugiere que las condiciones lumínicas puntuales durante el momento de la medición no generaron un impacto detectable sobre la fluorescencia del cultivo.

Por otro lado, se realizó también un análisis univariado por separado que tampoco reveló diferencias significativas (Fo:  $p = 0.609$ ; Fm:  $p = 0.394 > 0,05$ ). Estos resultados sugieren que, al menos para Fo y Fm, la fluorescencia no se vio afectada de forma estadísticamente relevante por la ubicación bajo los paneles agrivoltaicos en el momento de la medición.

Dado que varias variables de fluorescencia derivadas ( Fv, Fo/Fm, Fv/Fm y phi(Po)) presentaban correlaciones casi perfectas con las variables base (Fo, Fm), se decidió excluirlas del análisis MANOVA para evitar colinealidad y asegurar la validez estadística del modelo.

- **Fv:** Dado que Fv es un parámetro derivado directamente de Fo y Fm ( $Fv = Fm - Fo$ ), se analizó de forma univariada, al no cumplir con los supuestos de independencia requeridos para un análisis multivariante. Para determinar el enfoque estadístico adecuado, se evaluaron la normalidad y la homocedasticidad mediante el test de Shapiro-Wilk y ANOVA, respectivamente. El test de Shapiro-Wilk indicó que los datos no seguían una distribución normal ( $p = 9,937 \times 10^{-5} < 0,05$ ), por lo que se descartó el uso de pruebas paramétricas. En consecuencia, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para analizar las posibles diferencias entre filas.

Los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de Fv entre las franjas horarias ( $p=0,357 > 0,05$ ), lo que indica que la variabilidad entre los grupos evaluados no fue suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad.

- Fo/Fm, Fv/Fm y Phi(Po):** En el caso de los parámetros fluorescentes Fo/Fv, Fv/Fm y Phi(Po), la prueba de Kruskal-Wallis no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las filas evaluadas ( $p=0,622 > 0,05$  en todos los casos), obteniéndose resultados idénticos en los tres índices. Esta coincidencia se explica por la estrecha relación matemática entre dichos parámetros, ya que derivan de las mismas variables primarias, lo que se traduce en una distribución muy similar entre grupos. Esta alta correlación reduce la sensibilidad del análisis estadístico para detectar posibles diferencias reales. No obstante, la homogeneidad observada sugiere que, bajo las condiciones lumínicas existentes durante la medición, no se produjeron variaciones relevantes en la eficiencia del fotosistema II en función de la posición de las plantas dentro del invernadero.

En las Figuras 28-33 se representan los boxplots de los parámetros de fluorescencia analizados en las distintas filas del sistema agrivoltaico. Se aprecia una ligera variabilidad entre grupos, especialmente en los valores máximos de Fo y Fm. Esta dispersión podría estar relacionada con variaciones puntuales en la exposición a la luz o en el estado fisiológico de las plantas en el momento de la medición.

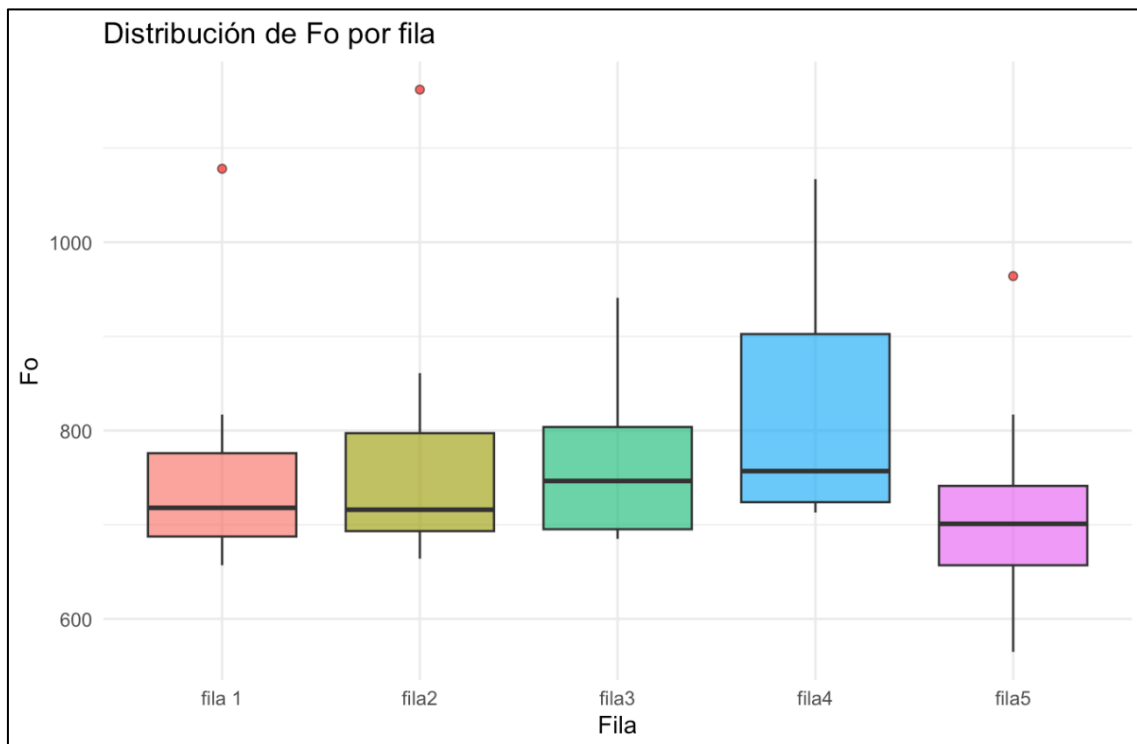


Figura 28. Evolución del parámetro Fo a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.

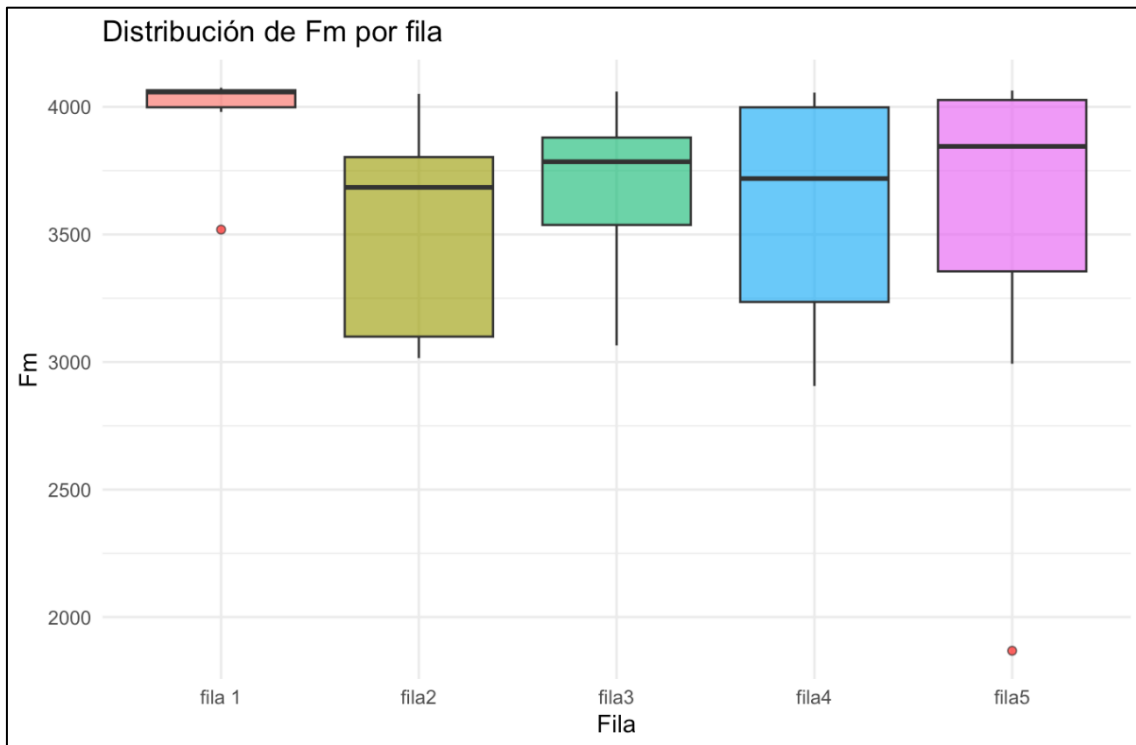


Figura 29. Evolución del parámetro Fm a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.

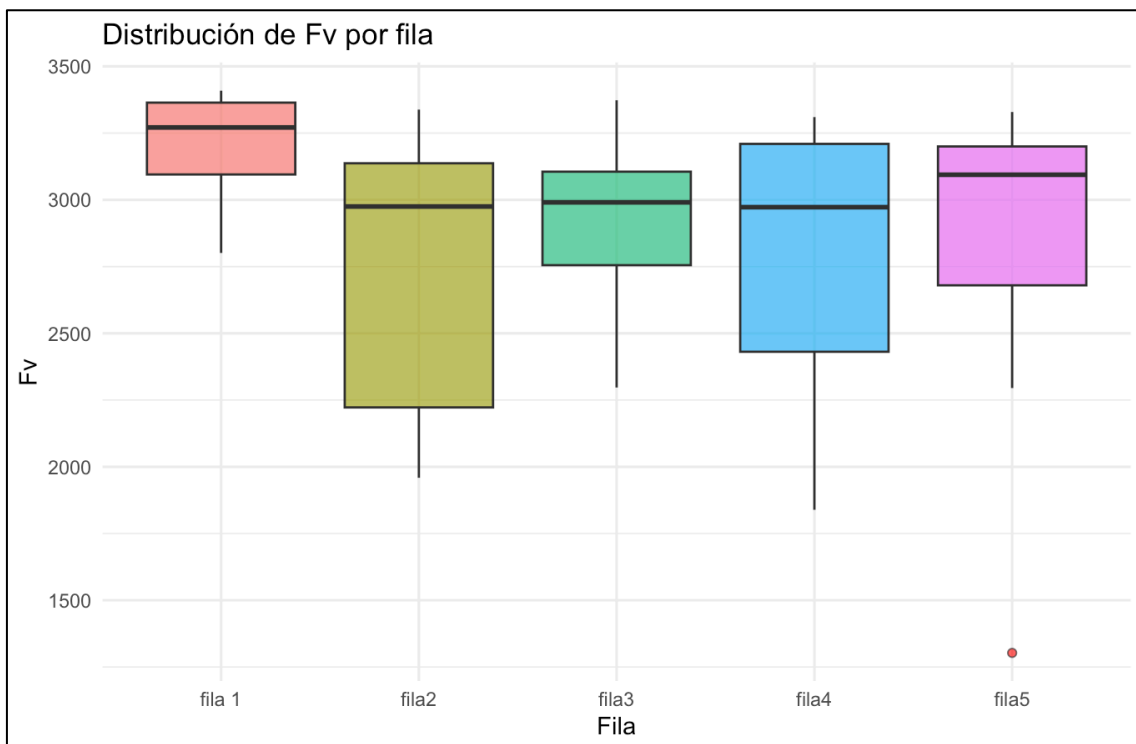


Figura 30. Evolución del parámetro Fv a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.

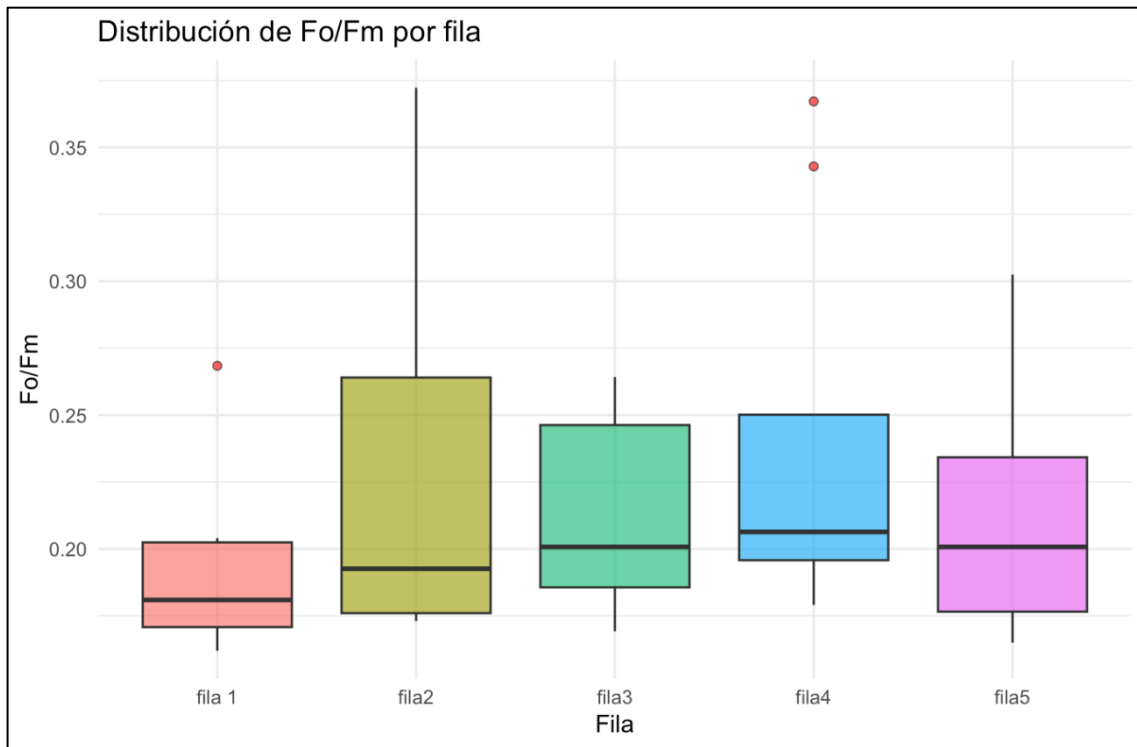


Figura 32. Evolución del parámetro Fo/Fm a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.

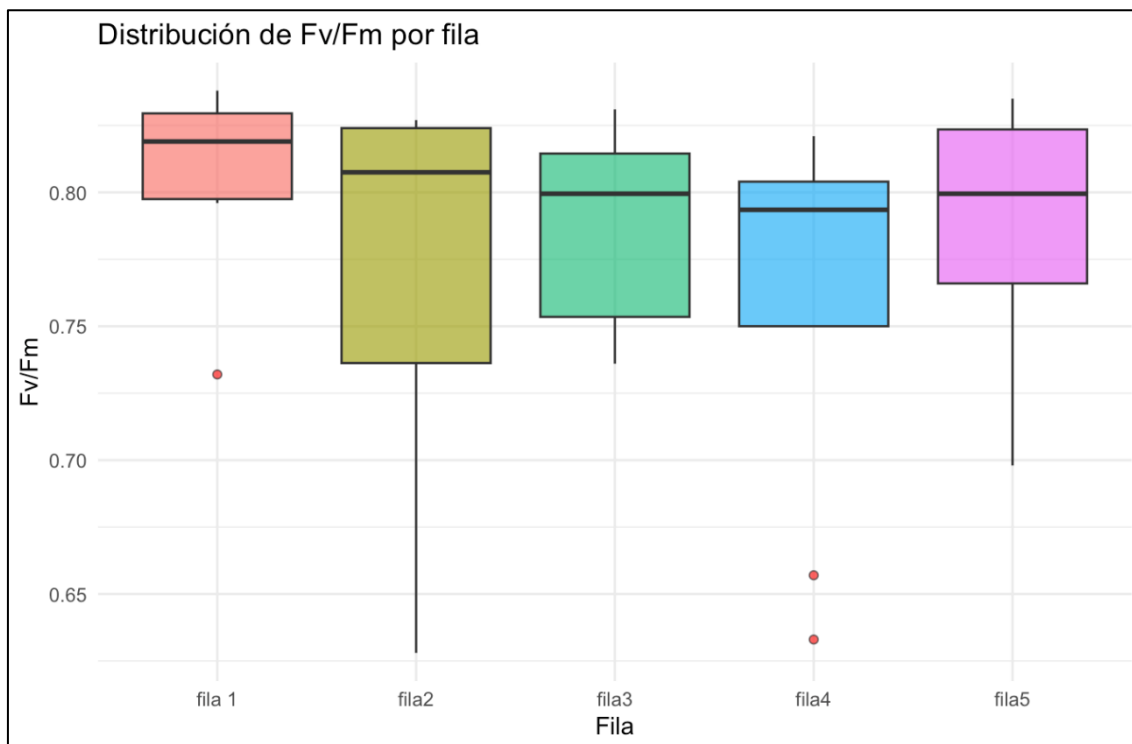


Figura 31. Evolución del parámetro Fv/Fm a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.

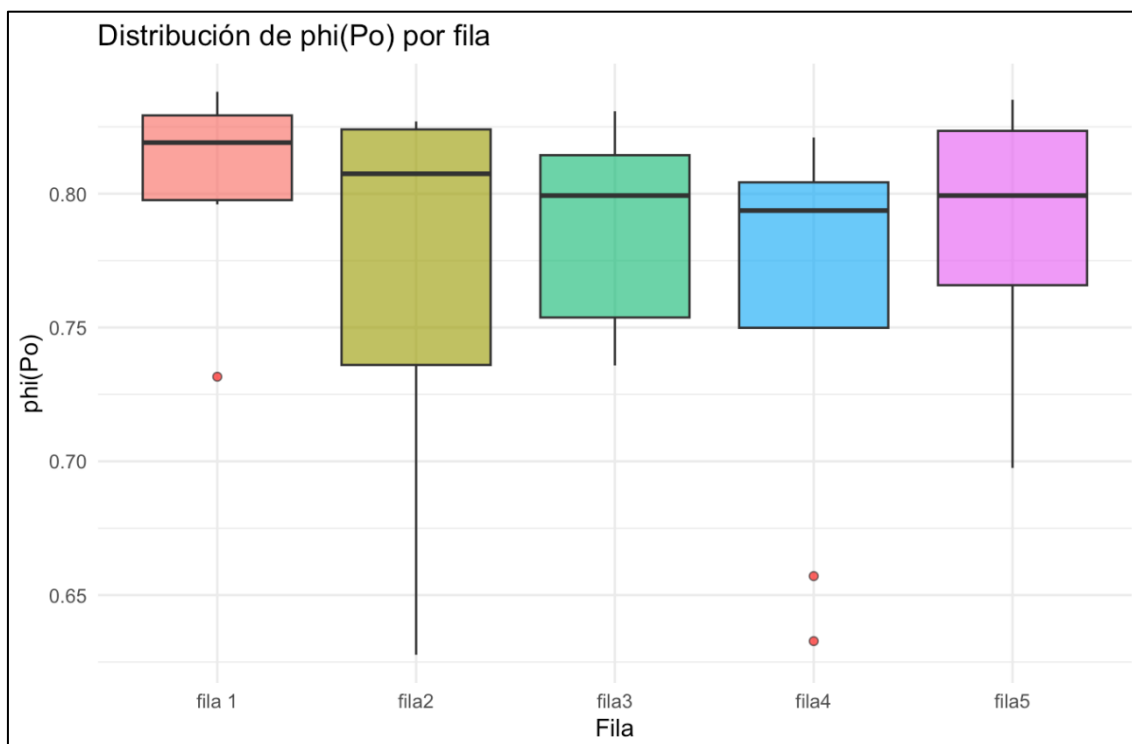


Figura 33. Evolución del parámetro Phi(Po) a lo largo de las filas para el cultivo del puerro.

#### 4.3.2. ACELGA

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de la acelga se muestran en el Anejo B (véase Figura B.8).

Se aplicó un MANOVA entre filas para los parámetros de Fo y Fm, considerados variables independientes en la fluorescencia clorofílica. Los índices derivados (Fv, Fo/Fm, Fv/Fm o Phi(Po)).

El test de Pillai's Trace no mostró diferencias estadísticamente significativas entre grupos (Pillai = 0,138;  $p = 0,876 > 0,05$ ), lo que indica que la posición de las filas dentro del invernadero no ejerció un efecto multivariado relevante sobre Fo y Fm. Estos resultados fueron coherentes con los obtenidos en los análisis univariados individuales, donde tampoco se detectaron diferencias significativas (Fo:  $p = 0,657$ ; Fm:  $p = 0,847 > 0,05$ ).

En conjunto, los datos sugieren que, al menos en el momento de la medición, las condiciones lumínicas bajo los paneles agrivoltaicos no generaron un efecto estadísticamente significativo sobre la fluorescencia del cultivo en términos de Fo y Fm.

Debido a que varios parámetros derivados de fluorescencia (Fv, Fo/Fm, Fv/Fm y Phi(Po)) mostraban correlaciones muy altas con las variables originales Fo y Fm, se

optó por no incluirlos en el análisis MANOVA, tal y como se hizo para el cultivo del puerro.

- **Fv:** en el caso de acelga, se descartó nuevamente el uso de pruebas paramétricas para el parámetro Fv, por tratarse de una variable derivada y asumir distribución no normal. El análisis mediante Kruskal-Wallis no mostró diferencias significativas entre filas ( $p=0,7394$ ), por lo que no se evidenció variabilidad estadísticamente relevante.
- **Fo/Fv, Fv/Fm, Phi(Po):** Los índices Fo/Fv, Fm/Fv y Phi(Po) no mostraron resultados equivalentes entre filas del cultivo de acelga ( $p=7868$ ), sin diferencias estadísticamente significativas. Esta homogeneidad puede atribuirse a la estrecha dependencia entre dichos parámetros, todos derivados de Fo y Fm, lo que limita su capacidad discriminativa en este contexto.

En las Figuras 34–39 se representan los boxplots de los parámetros de fluorescencia analizados en plantas de acelga. A pesar de que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre filas, estos gráficos permiten visualizar la distribución de los datos y detectar la presencia de valores atípicos, especialmente en los parámetros Fo y Fm.

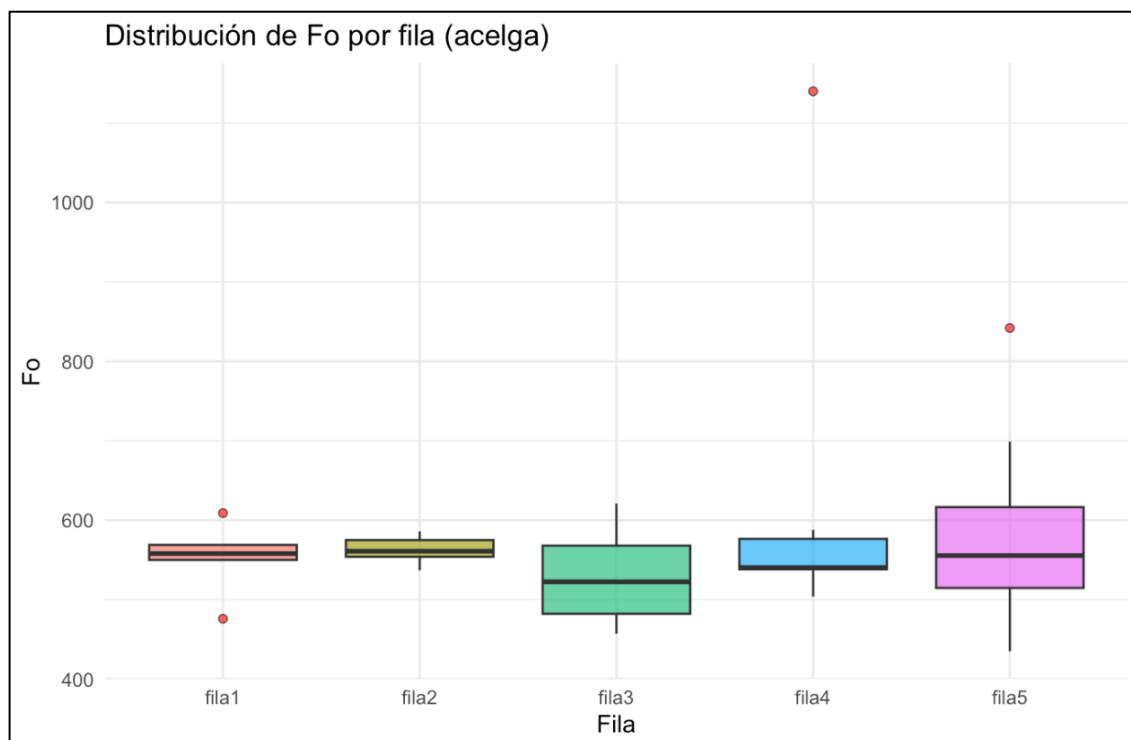


Figura 34. Evolución del parámetro Fo a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.

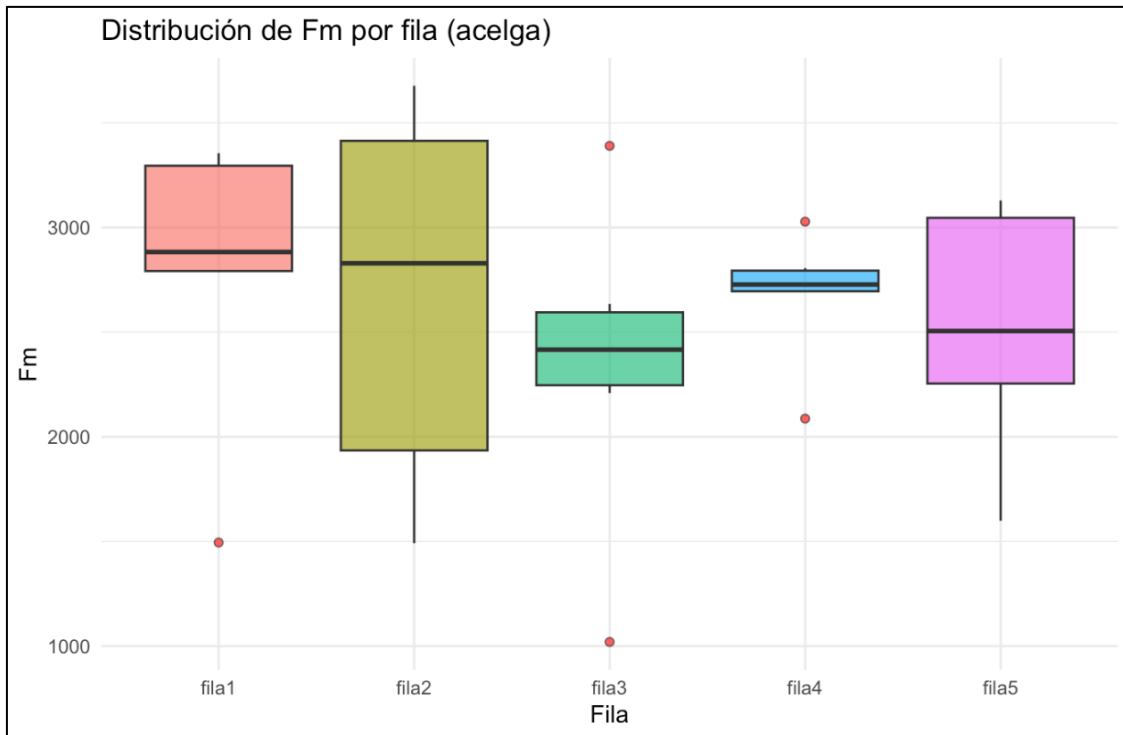


Figura 35. Evolución del parámetro Fm a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.

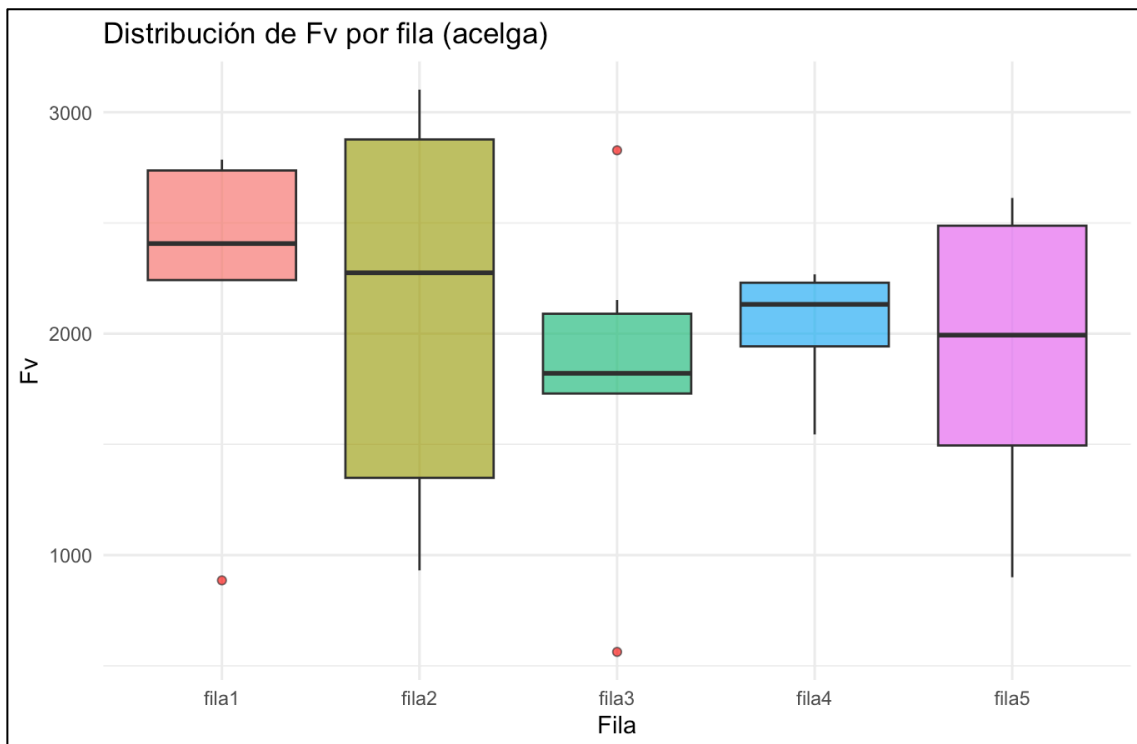


Figura 36. Evolución del parámetro Fv a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.

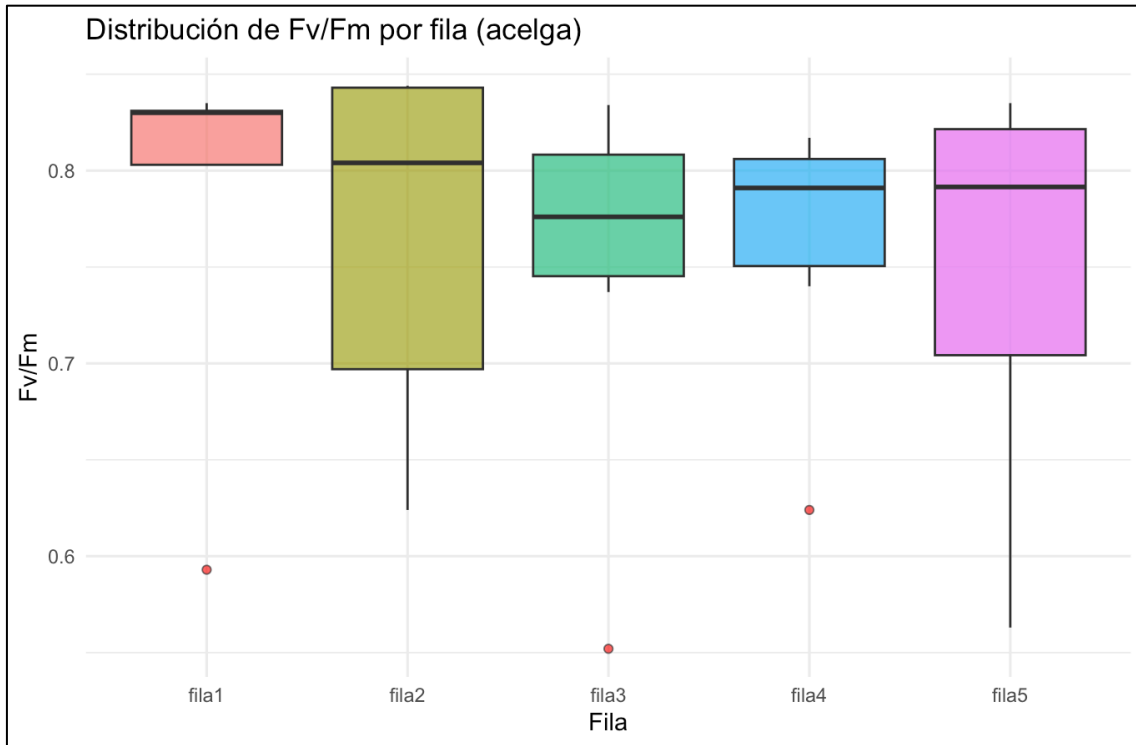


Figura 38. Evolución del parámetro Fv/Fm a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.

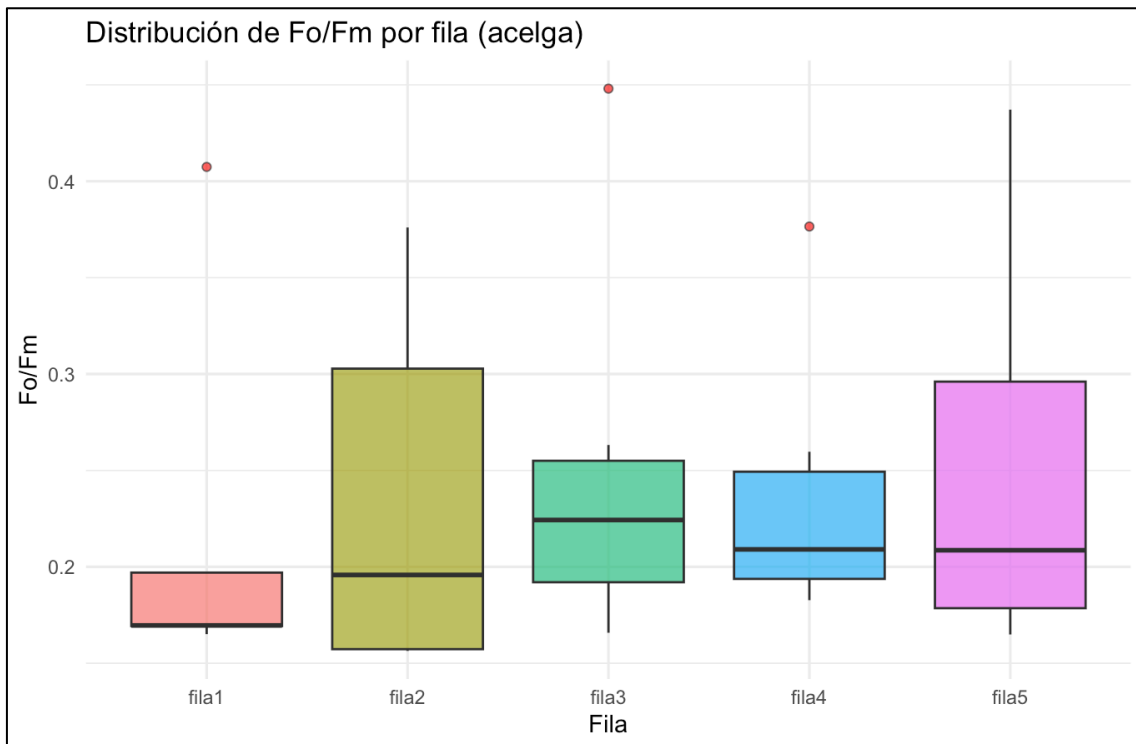


Figura 37. Evolución del parámetro Fo/Fm a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.

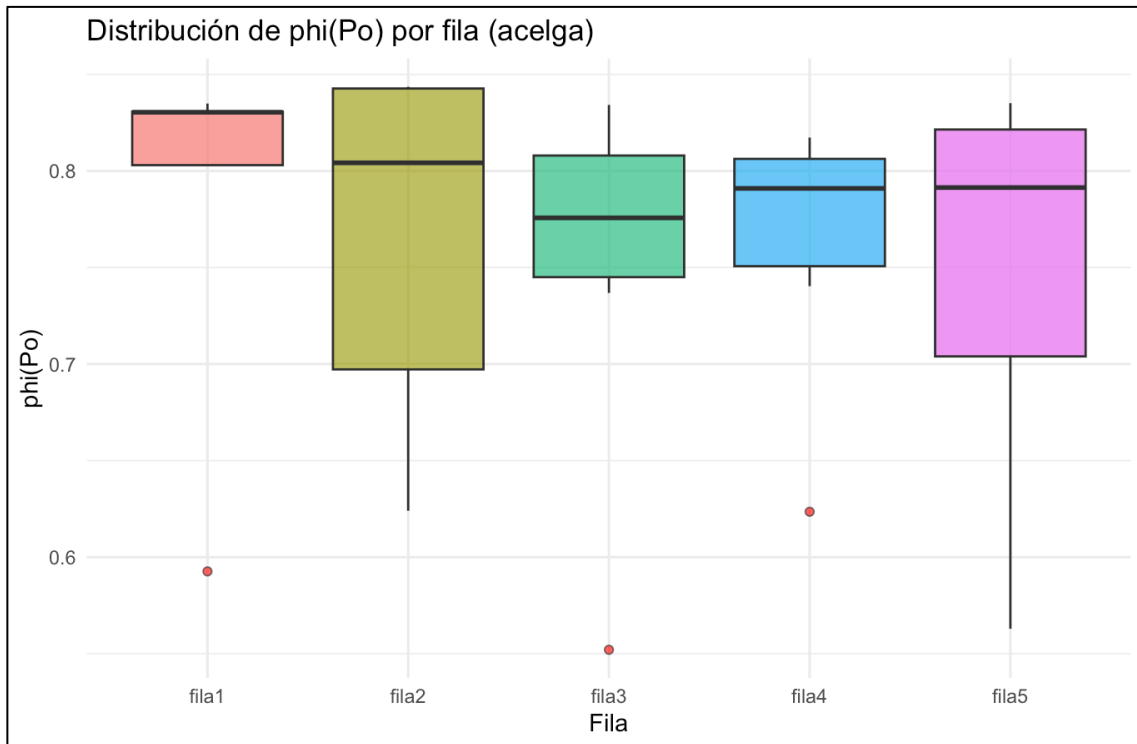


Figura 39. Evolución del parámetro Phi(Po) a lo largo de las filas para el cultivo de la acelga.

#### 4.4. RESULTADOS PLANTAS AROMÁTICAS.

##### 4.4.1. RENDIMIENTOS

##### 4.4.1.1. Salvia

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de salvia se muestran en el Anejo B (véase Figura B.9).

El rendimiento de salvia mostró diferencias significativas en función del año y el tipo de tratamiento lumínico ( $p < 0,05$ ). Según los resultados de la Tabla 9, las condiciones de mayor irradiación en 2023 se asociaron con los valores más elevados, mientras que los tratamientos con sombra continua, especialmente en 2022 y 2024, presentaron los rendimientos más bajos. Las letras asignadas reflejan la agrupación estadística de las combinaciones evaluadas.

Tabla 10. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para salvia.

Prueba de Kruskal-Wallis [Salvia]				
K (valor observado)				54,031
K (valor crítico)				15,51
GL				8
p-valor (unidimensional)				0,00000681
alfa				0,05
Muestra	Frecuencia	Suma-Rangos	Media-Rangos	Grupos
2022_sol	7	266	38	A B C
2022_sombra	7	48	6,86	A
2022_sol-sombra	7	340	48,6	B C
2023_sol	7	384	54,9	B
2023_sombra	7	160	22,9	A C
2023_sol-sombra	7	369	52,7	B C
2024_sol	7	177	25,3	A B C
2024_sombra	7	57	8,14	A
2024_sol-sombra	7	214	30,6	A B C

La Figura 40 muestra un diagrama de cajas donde se visualiza la distribución del rendimiento en cada combinación de año y tratamiento. Las letras sobre cada caja representan los resultados de la prueba de post hoc de Dunn, facilitando la interpretación visual de los grupos homogéneos. Puede observarse que, en general, los tratamientos con mayor exposición a la radiación (como el tratamiento sol-sombra en 2023) tienden a presentar rendimientos más elevados, mientras que las condiciones de sombra continua, especialmente en 2022 y 2024, se asocian con menores valores.

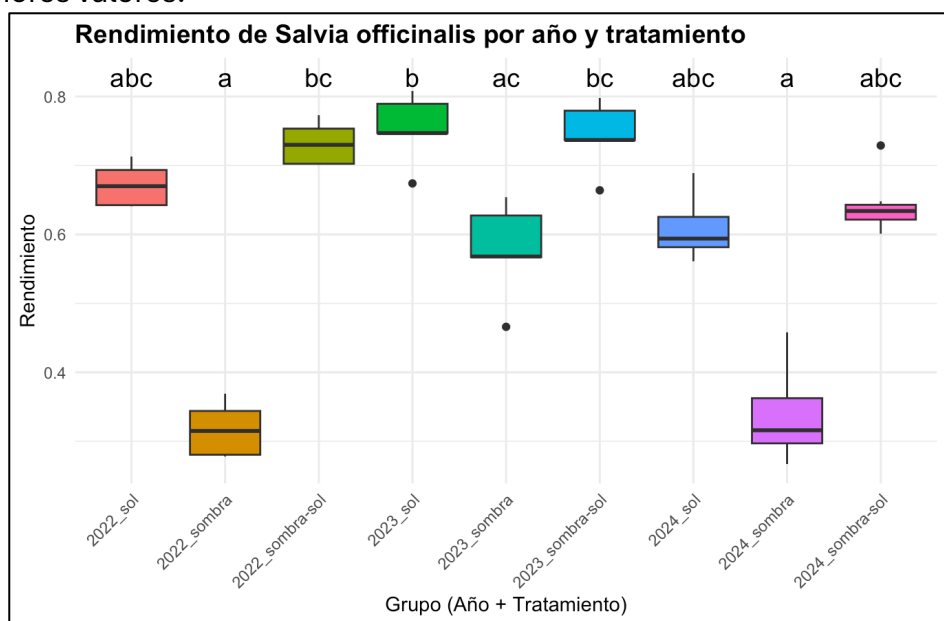


Figura 40. Distribución del rendimiento de salvia en función del año y el tratamiento lumínico.

#### 4.4.1.2. Menta

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de menta se muestran en el Anejo B (véase Figura B.10).

En el caso de la menta, se observaron diferencias significativas en el rendimiento según el año y el tipo de tratamiento lumínico ( $p < 0,05$ ). En 2022, las condiciones de alta irradiación favorecieron la producción, mientras que los tratamientos con sombra parcial y continua en 2023 registraron los valores más bajos. La Tabla 11 muestra la clasificación estadística de los grupos, marcada por solapamientos debido a la presencia de rendimientos intermedios sin diferencias significativas clara.

Tabla 11. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para menta.

Prueba de Kruskal-Wallis [Menta]				
K (valor observado)				60,882
K (valor crítico)				15,51
GL				8
p-valor (unidimensional)				0,000000313
alfa				0,05
Muestra	Frecuencia	Suma-Rangos	Media-Rangos	Grupos
2022_sol	7	420	60	A
2022_sombra	7	273	39	A B C D
2022_sol-sombra	7	222	31,7	A B C D E
2023_sol	7	36,5	5,21	E
2023_sombra	7	177	25,3	B C D E
2023_sol-sombra	7	68,5	9,79	B E
2024_sol	7	126	18	B C E
2024_sombra	7	322	46	A C D
2024_sol-sombra	7	371	53	A D

La Figura 41 muestra la distribución del rendimiento de menta según el año y el tratamiento lumínico aplicado. Los mayores rendimientos se observaron en condiciones de alta irradiación, especialmente en “2022\_sol” y “2024\_sombra-sol”, lo que indica una respuesta positiva de la especie a una mayor disponibilidad de luz. En cambio, los tratamientos aplicados durante 2023, en particular bajo sombra, se asociaron con los valores más bajos, lo que podría reflejar un menor desarrollo vegetativo debido a la limitación de radiación. Estos resultados evidencian la influencia de la radiación sobre la productividad del cultivo, así como

posibles efectos interanuales vinculados a las condiciones ambientales propias de cada campaña.

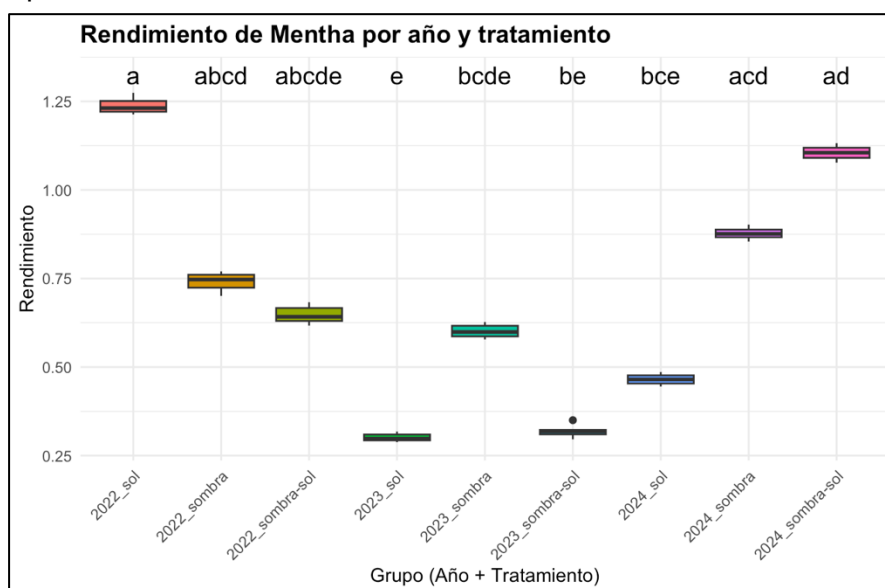


Figura 41. Distribución del rendimiento de menta en función del año y el tratamiento lumínico.

#### 4.4.1.3. Orégano.

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de orégano se muestran en el Anejo B (véase Figura B.11).

El rendimiento de orégano varió significativamente según el año y el tratamiento lumínico ( $p < 0,05$ ). En 2022, las condiciones de sol y sol-sombra favorecieron la producción, mientras que en 2023, especialmente bajo sombra, se obtuvieron los valores más bajos. La Tabla 12 muestra las agrupaciones estadísticas, con solapamientos entre tratamientos intermedios.

Tabla 12. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para orégano.

Prueba de Kruskal-Wallis [Orégano]				
K (valor observado)				56,875
K (valor crítico)				15,51
GL				8
p-valor (unidimensional)				0,00000191
alfa				0,05
Muestra	Frecuencia	Suma-Rangos	Media-Rangos	Grupos
2022_sol	7	337	48,1	A
2022_sombra	7	200	28,6	A B C
2022_sol-sombra	7	406	58	A
2023_sol	7	107	15,3	B C
2023_sombra	7	88	12,6	B

2023_sol-sombra	7	36	5,14	B
2024_sol	7	330	47,1	B
2024_sombra	7	199	28,4	A C C
2024_sol-sombra	7	314	44,8	A C

La Figura 42 muestra la distribución del rendimiento de orégano en función del año y del tratamiento lumínico. Las letras sobre cada grupo indican los resultados del test de Dunn con corrección de Bonferroni, permitiendo visualizar los grupos estadísticamente homogéneos. Se observa que los tratamientos con mayor irradiación en 2022, especialmente sol-sombra y sol, presentan los rendimientos más elevados. En contraste, los tratamientos aplicados en 2023, independientemente del nivel de sombra, muestran los valores más bajos, lo que sugiere una limitación común posiblemente asociada a condiciones ambientales adversas ese año. La distribución de letras refleja la existencia de solapamientos entre grupos con rendimientos intermedios, como “2022\_sombra” o “2024\_sombra”, que no difieren significativamente de los extremos, lo que refuerza la influencia combinada del tratamiento y del año sobre la productividad.

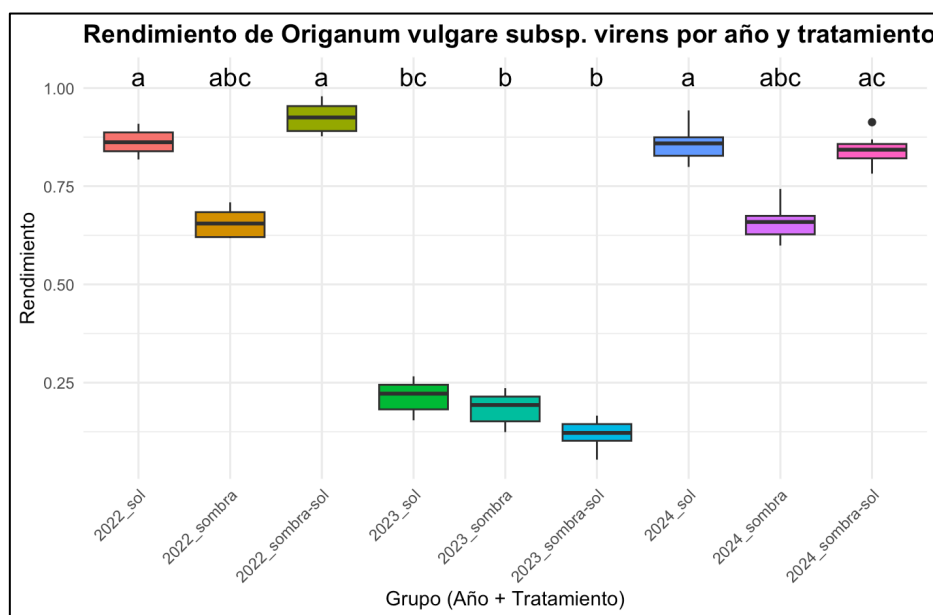


Figura 42. Distribución del rendimiento de orégano en función del año y el tratamiento lumínico.

#### 4.4.1.4. Ajenjo

Los datos obtenidos de la estadística descriptiva para el cultivo de ajenjo se muestran en el Anejo B (véase Figura B.12).

El rendimiento de ajenjo mostró diferencias significativas según el año y el tratamiento lumínico ( $p < 0,05$ ). Los valores más bajos se registraron en 2023,

especialmente bajo sombra y sol, mientras que los más altos se dieron en 2024, con mejores resultados en sol-sombra. La Tabla 13 recoge las agrupaciones estadísticas, destacando una clara separación entre campañas.

Tabla 13. Resultados del test de Kruskal-Wallis y prueba post hoc de Dunn para ajeno.

Prueba de Kruskal-Wallis [Ajeno]				
K (valor observado)				60,464
K (valor crítico)				15,51
GL				8
p-valor (unidimensional)				3,78E-10
alfa				0,05
Muestra	Frecuencia	Suma-Rangos	Media-Rangos	Grupos
2022_sol	7	232	33,1	A B C D
2022_sombra	7	151	21,6	A B C
2022_sol-sombra	7	150	21,4	A B C
2023_sol	7	77	11	A B
2023_sombra	7	28	4	A
2023_sol-sombra	7	371	53	D
2024_sol	7	265	37,9	B C D
2024_sombra	7	322	46	C D
2024_sol-sombra	7	420	60	D

La Figura 43 muestra la distribución del rendimiento de ajeno en función del año y el tratamiento lumínico aplicado. Las letras sobre cada grupo indican los resultados del test de Dunn con corrección de Bonferroni, permitiendo identificar conjuntos estadísticamente homogéneos. Se observa que los tratamientos aplicados durante 2024, especialmente “2024\_sol-sombra”, presentaron los valores más elevados, mientras que los rendimientos más bajos se concentraron en las condiciones de sombra del año 2023. Los tratamientos de 2022 y parte de los de 2023 muestran valores intermedios con solapamientos entre grupos, lo que refleja una influencia combinada del tratamiento lumínico y del año de cultivo sobre la productividad de la especie.

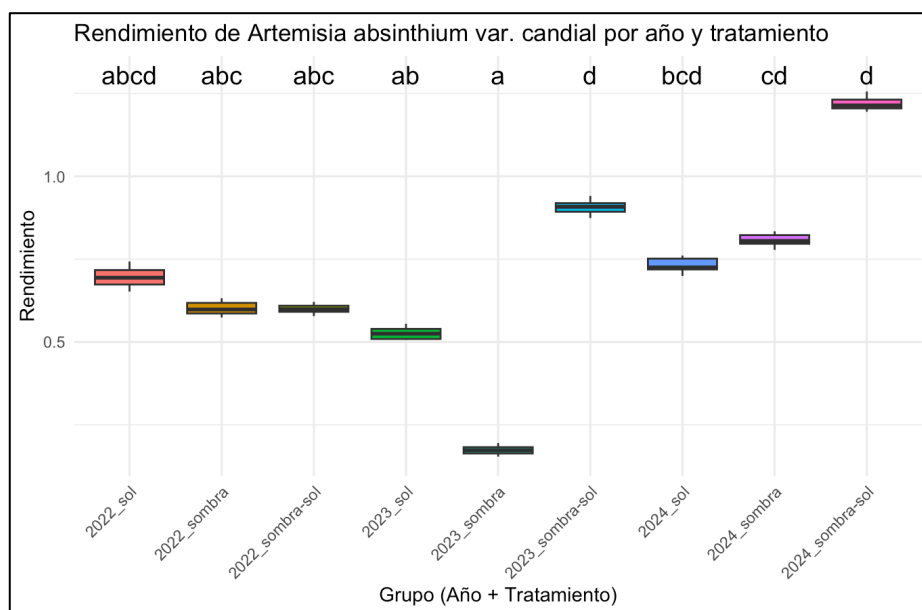


Figura 43. Distribución del rendimiento de ajeno en función del año y el tratamiento lumínico.

## 4.5. RESULTADOS DE LA ANALÍTICA DE LOS COMPUESTOS

### 4.5.1. Salvia.

#### **$\alpha$ -tujona**

Los resultados muestran una disminución progresiva en la concentración de  $\alpha$ -tujona en todas las condiciones lumínicas. En pleno sol, se registraron valores del 37,9% en 2022, 25,6% en 2023 y 21,52% en 2024. En sombra media, las concentraciones fueron ligeramente superiores a las de sol en 2022 y 2023 (38,8% y 27,5%, respectivamente), pero no se disponen de datos para 2024. En sombra total, los valores fueron significativamente menores desde el inicio (21,2% en 2022, 22,8% en 2023) y no se obtuvieron datos en 2024.

La  $\alpha$ -tujona es un monoterpeneo clave en la defensa de la planta, con actividad repelente contra insectos y alelopática. Su reducción bajo sombra total podría indicar una menor capacidad defensiva de la planta frente a plagas y patógenos, lo que podría comprometer su desarrollo en sistemas de baja radiación.

#### **1,8-cineol**

En cuanto al 1,8-cineol, los valores en pleno sol aumentaron de 11,3% en 2022 a 18,7% en 2023, con una leve disminución a 16,98% en 2024. En sombra media, se observó una tendencia similar (9,12% en 2022 y 16,3% en 2023), aunque no se dispone de datos para 2024. Sorprendentemente, en sombra total, la concentración fue baja en 2022 (4,16%), pero aumentó considerablemente en 2023 (16,7%), sin datos disponibles para 2024.

El 1,8-cineol es un compuesto con propiedades antimicrobianas y antifúngicas. Su aumento en 2023 en sombra total podría indicar una respuesta adaptativa de la planta a condiciones de menor radiación, posiblemente vinculada a un cambio en el metabolismo secundario inducido por el estrés lumínico.

#### 4.5.2. Orégano.

##### **timol**

El contenido de timol mostró una notable variación entre las campañas. En pleno sol, se registró un descenso abrupto de 9,77% en 2022 a 0,69% en 2023, con una recuperación hasta 16,3% en 2024. En sombra parcial, se observó un comportamiento similar (12,2% en 2022, 0,87% en 2023, 22,3% en 2024). Sin embargo, en sombra total, los valores se mantuvieron bajos en todas las campañas (8,65% en 2022, 3,75% en 2023 y 3,82% en 2024).

El timol es un fenol con fuertes propiedades antimicrobianas y antioxidantes. Su reducción en 2023 podría estar asociada a condiciones ambientales adversas, mientras que su recuperación en 2024 en condiciones de mayor iluminación indica una relación directa con la radiación solar en su biosíntesis.

##### **γ-terpineno**

A diferencia del timol, el γ-terpineno se mantuvo relativamente estable a lo largo de las campañas. En pleno sol, aumentó ligeramente de 18% en 2022 a 22,8% en 2024. En sombra parcial, hubo una leve reducción de 21,9% en 2022 a 20,3% en 2024. En sombra total, se observó un incremento progresivo de 21,3% en 2022 a 24,9% en 2024.

El γ-terpineno es un precursor del timol y carvacrol, compuestos con actividad biológica relevante. Su estabilidad sugiere que su producción es menos dependiente de la radiación, aunque su ligero incremento en sombra total podría indicar un ajuste metabólico compensatorio.

##### **ρ-cimeno**

El ρ-cimeno mostró una tendencia decreciente en todas las condiciones. En pleno sol, disminuyó de 25,9% en 2022 a 4,28% en 2024. En sombra parcial, se registró una caída similar de 27,9% en 2022 a 4,21% en 2024. En sombra total, los valores también descendieron de 24,7% en 2022 a 4,72% en 2024.

El ρ-cimeno es un monoterpeno relacionado con la protección contra herbívoros y patógenos. Su disminución constante en todas las condiciones podría indicar un cambio en la asignación de recursos metabólicos, priorizando otros compuestos bioactivos en respuesta a variaciones ambientales.

#### 4.5.3. Menta.

##### **piperitenona**

La concentración de piperitenona en menta mostró una tendencia variable según la intensidad del sombreado. En condiciones de pleno sol, se observó una disminución drástica de 54,2% en 2022 a 22,1% en 2023, con una ligera recuperación a 25,4% en 2024. En sombra parcial, se produjo un aumento progresivo desde 29% en 2022 hasta alcanzar 57% en 2024. En sombra total, la concentración fue elevada y en aumento a lo largo de las campañas (42,9% en 2022, 39,8% en 2023 y 61,9% en 2024).

La piperitenona es un precursor clave en la biosíntesis de oxóxidos monoterpénicos, con actividad alelopática y repelente de insectos. Su mayor acumulación en condiciones de sombra total podría estar relacionada con una respuesta adaptativa a la reducción de la radiación solar, favoreciendo la producción de metabolitos secundarios para la defensa química.

##### **piperitenona-óxido**

En contraste con la piperitenona, el piperitenona-óxido presentó una tendencia decreciente en sombra parcial y total a lo largo de las campañas. En sombra parcial, los valores descendieron de 50,9% en 2022 a 18,4% en 2024, mientras que en sombra total se redujeron de 38,6% en 2022 a 10,4% en 2024. Sin embargo, en sombra media, la concentración aumentó de 30,6% en 2022 a 42,6% en 2023, con una ligera disminución a 39,9% en 2024.

El piperitenona-óxido es un compuesto con propiedades antimicrobianas y antioxidantes. Su reducción en sombra total sugiere un posible cambio en la ruta metabólica de la planta, priorizando la acumulación de otros compuestos en respuesta al ambiente lumínico reducido.

#### 4.5.4. Ajenjo.

##### **Z-Epoxyocimeno**

Los datos disponibles para *Artemisia absinthium var. candidal* corresponden a la campaña 2022, mostrando que la concentración de Z-Epoxyocimeno fue más alta en sombra parcial (47,6%) en comparación con pleno sol (40%) y sombra total (42,7%).

El Z-Epoxyocimeno es un compuesto volátil asociado a la comunicación interplanta y la defensa frente a herbívoros. Su mayor presencia en condiciones de sombra parcial podría estar relacionada con un mecanismo de adaptación a fluctuaciones lumínicas, optimizando su función en la interacción ecológica.

## 4.6. SIMULACIONES

### 4.6.1. SIMULACIONES DEL SOMBREADO

La simulación realizada con SketchUp (Figura 44) evidenció que las pérdidas de radiación solar varían a lo largo del año, con un mínimo del 33,8 % en diciembre y un máximo del 45,9 % en julio. El período de mayor sombreado coincide con los meses de máxima radiación (junio a septiembre, con pérdidas entre 42,2 % y 45,9 %), lo cual podría resultar beneficioso al proporcionar protección adicional durante las épocas de mayor estrés térmico y radiativo para los cultivos.

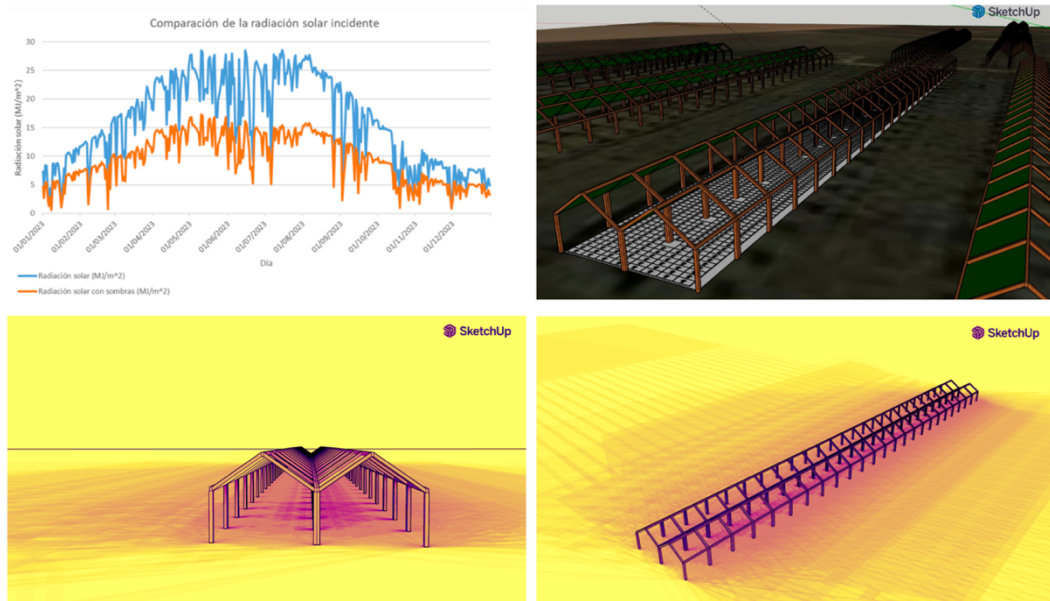


Figura 44. Simulación del sistema agrivoltaico: (a) comparación de la radiación solar incidente diaria con y sin sombreado; (b) vista del modelo SketchUp con la estructura y malla de sombreado; (c-d) vista superior de la estructura con distribución de sombra.

### 4.6.2. SIMULACIONES DEL USO DEL AGUA Y EL CRECIMIENTO

Por otro lado, la modelización con AquaCrop permitió evaluar el efecto del sombreado sobre la producción de biomasa y el uso del agua (Tabla 14). Los resultados mostraron una reducción media del 8 % en la biomasa total bajo condiciones de sombra en los tres cultivos analizados. Sin embargo, la evapotranspiración se redujo en un 22–24 %, lo que se tradujo en una mejora de la eficiencia en el uso del agua (WUE) de entre 16,7 % y 20,6 %. El puerro presentó la mayor sensibilidad al sombreado en términos de producción, mientras que la acelga mostró una mejor adaptación, destacando en eficiencia hídrica.

Tabla 14. Resultados simulados de biomasa total (kg/ha), evapotranspiración (mm) y eficiencia en el uso del agua (WUE, kg/m<sup>3</sup>) bajo condiciones de sombra y sin sombra para los tres cultivos estudiados.

Cultivo	Biomasa (t/ha)		Productividad del agua evapotranspirada (Kg/m <sup>3</sup> )	
	Sin sombreo	Con sombreo	Sin sombreo	Con sombreo
Acelga	10,72	9,85	3,56	4,23
Borraja	8,25	7,58	3,02	3,59
Puerro	10,1	9,28	3,44	4,09

## 5. DISCUSIONES

### 5.1. CULTIVOS HORTÍCOLAS.

#### 5.1.1. SPAD

El índice SPAD, empleado como indicador indirecto del contenido de clorofila, ha demostrado ser una herramienta válida y ampliamente utilizada para evaluar el estado fisiológico y nutricional de las plantas de forma rápida y no destructiva. En el presente ensayo, se empleó el medidor SPAD para analizar posibles efectos del sombreado simulado por estructuras agrivoltaicas sobre acelga, borraja y puerro. Si bien las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre filas en ningún cultivo ( $p > 0,05$ ), se observaron ciertas tendencias horarias y variaciones en la respuesta según la especie que merecen discusión.

En comparación con lo observado por (Ayala-Tafoya *et al.*, 2011), donde los valores de SPAD aumentaron bajo mallas que transmitían mayor luz azul y roja, los resultados obtenidos en este estudio muestran un comportamiento distinto, probablemente por el tipo de sombreado utilizado (paneles opacos fijos) y la especie vegetal analizada. Mientras que en tomate se registró un incremento asociado a determinadas calidades lumínicas, en este caso no se observaron diferencias significativas, lo que sugiere que el efecto del sombreado agrivoltaico sobre la síntesis de clorofila puede estar condicionado tanto por el espectro de luz transmitido como por la sensibilidad específica del cultivo.

Estos resultados son coherentes con las observaciones de este trabajo, donde en acelga se registraron los valores más altos a las 11:00 y una disminución general a las 12:30, momento del día en que la irradiancia era más elevada. Este descenso podría interpretarse como una señal de estrés fotoinhibitorio o reducción del contenido de clorofila por exceso de luz, tal como describe el artículo mencionado. En el caso de borraja, aunque no se observaron diferencias significativas entre filas, los valores SPAD se mantuvieron relativamente estables e incluso con una ligera tendencia al alza hacia el mediodía. Este comportamiento podría estar asociado a una mayor tolerancia de esta especie a ambientes iluminados o a una distribución foliar que atenúe el impacto directo de la radiación, comportamiento similar al

descrito en el tomate para hojas internas o sombreadas. Para el puerro, los resultados fueron intermedios y también sin diferencias estadísticas, aunque se apreciaron valores ligeramente superiores a las 12:30. Esta estabilidad puede deberse a una morfología foliar menos sensible a la variación lumínica o a un mecanismo de adaptación a la sombra intermitente.

Khudhair *et al.*, 2025 también observaron una mejora en el contenido de clorofila en condiciones de sombra, especialmente cuando se aplicaban prácticas como la biofertilización y un riego óptimo. Aunque los valores que reportan no fueron medidos mediante SPAD, la tendencia coincide con lo observado en este trabajo, lo que refuerza la hipótesis de que un ambiente lumínico atenuado puede favorecer la acumulación de clorofila en determinadas especies.

Además, en estudios de agricultura vertical como el de Cossu *et al.*, 2023, se relaciona directamente la disponibilidad de luz con la eficiencia en el uso de la radiación (RUEf), observando que bajo menor DLI las lechugas tenían mayor eficiencia fotosintética. Esto sugiere que ciertas condiciones de sombra moderada pueden optimizar la fisiología vegetal, como también apuntan los resultados aquí obtenidos.

En conjunto, los resultados de este trabajo apuntan a que, si bien el sistema agrivoltaico simulado no produjo una alteración estadísticamente significativa en los valores SPAD de los cultivos hortícolas evaluados, sí generó una variabilidad intraespecífica y horaria atribuible al microclima heterogéneo propio de este tipo de instalaciones. Este efecto también ha sido reportado en otros trabajos con especies hortícolas bajo distintas condiciones de radiación filtrada, lo cual refuerza la importancia de considerar no solo la cantidad total de luz, sino también su calidad espectral y distribución temporal en el diseño de sistemas agrivoltaicos.

De forma similar a lo observado en este estudio, Torres-Bojorques *et al.*, 2017 detectaron un aumento en los valores SPAD en chile habanero cultivado bajo condiciones de sombra parcial, lo que sugiere que tanto la modificación del ambiente lumínico como el manejo agronómico (como el uso de acolchados) pueden influir positivamente en la acumulación de clorofila. Estos resultados respaldan la hipótesis de que el control de la radiación y otros factores de manejo pueden ser determinantes para optimizar la fisiología vegetal.

Estos resultados son coherentes con lo observado en el presente trabajo, donde la distribución de luz generada por las estructuras agrivoltaicas podría estar generando efectos similares a los producidos por los acolchados reflectantes. La mejora del microclima y la mayor reflectancia lumínica parecen favorecer la acumulación de clorofila en ciertos tratamientos o momentos del día, como se reflejó en las tendencias horarias observadas en acelga. Además, este artículo refuerza la interpretación de que ciertas condiciones de sombra parcial o

reflectancia mejorada pueden optimizar la fisiología vegetal sin afectar negativamente al rendimiento.

Rodríguez *et al.*, 2023, también reportaron una disminución en el contenido de clorofila en condiciones de estrés hídrico, lo que coincide con la tendencia general observada en este estudio. Estos resultados refuerzan la idea de que factores ambientales como la disponibilidad de agua pueden influir en los valores SPAD, incluso bajo estructuras de sombreado.

Este comportamiento refuerza la interpretación de los resultados obtenidos en este trabajo con el medidor SPAD en cultivos hortícolas, especialmente en acelga, donde se detectaron valores más altos de clorofila a las 11:00 y un descenso a las 12:30, coincidiendo con el aumento de la radiación incidente. La respuesta fisiológica al estrés, aunque en este caso lumínico más que hídrico, muestra patrones similares de pérdida de clorofila, lo cual da consistencia a los valores SPAD observados en el ensayo.

Aunque en el trabajo de Tang *et al.*, 2023 no se utilizó el medidor SPAD directamente, se midió el contenido relativo de clorofila con un CCM-200, lo cual permite una comparación con los valores SPAD obtenidos en este estudio. Se observó una disminución significativa del contenido de clorofila bajo condiciones de sombreado (30%), lo que los autores relacionan con una reducción en la capacidad fotosintética y una reconfiguración del aparato fotosintético para adaptarse a menor disponibilidad lumínica.

Este comportamiento coincide con algunas de las tendencias observadas en acelga, donde los valores SPAD disminuyeron en las horas de máxima irradiación, posiblemente por efectos de estrés lumínico o pérdida de clorofila. La comparación con un cultivo leñoso como el cerezo aporta valor al análisis, ya que pone de manifiesto mecanismos comunes de adaptación a distintos regímenes de luz entre especies.

Dal Prà *et al.*, 2025 observaron que niveles moderados de sombreado en sistemas agrivoltaicos no afectaron negativamente el índice SPAD en tomate, sino que incluso permitieron mantener cierta estabilidad a lo largo del ciclo productivo. Este tipo de respuesta coincide con lo observado en este estudio, donde los tratamientos de sombra parcial no generaron reducciones significativas en el contenido relativo de clorofila, lo que refuerza la idea de una posible aclimatación fisiológica bajo condiciones lumínicas atenuadas.

Estos datos concuerdan con lo observado en este trabajo, donde los valores de SPAD disminuyen en horas de alta radiación solar, especialmente en acelga, mientras que en condiciones de menor radiación los valores tienden a estabilizarse o ser más altos.

Min *et al.*, 2022 observaron que el sombreado parcial en sistemas agrivoltaicos no afectó negativamente el contenido relativo de clorofila en espinaca, lo que sugiere una alta capacidad de aclimatación a distintas condiciones lumínicas. Esta interpretación coincide con los resultados obtenidos en este estudio, donde los tratamientos de sombra moderada tampoco generaron reducciones significativas en los valores SPAD, lo que refuerza el potencial de compatibilidad entre producción vegetal y generación de energía.

Este resultado puede contrastarse con los valores SPAD observados en acelga y borraja en este trabajo, donde sí se registraron variaciones horarias y espaciales atribuibles a la distribución de radiación bajo AV. Esto sugiere que la respuesta del índice SPAD puede ser especie-específica o estar condicionada por el régimen ambiental, como la temperatura o la estacionalidad del ensayo.

### 5.1.2. CEPTÓMETRO.

Los datos obtenidos con el céptometro permitieron analizar la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (PAR) a lo largo del día en diferentes filas de cultivo bajo estructuras agrivoltaicas. Aunque el análisis estadístico no reveló diferencias significativas en todos los casos, se observaron variaciones horarias y espaciales en la cantidad de luz que llegaba al dosel vegetal, especialmente en especies como la borraja.

Según el informe técnico de Fraunhofer ISE (2021)(Asa'a *et al.*, 2024), la distribución de la luz en sistemas agrivoltaicos depende fuertemente de la orientación y diseño de los módulos solares. Los sistemas con orientación Este-Oeste y paneles verticales bifaciales, por ejemplo, promueven una mayor homogeneidad en la distribución del PAR en el dosel, lo que se traduce en mayor eficiencia de uso de la radiación (LER). Este tipo de observaciones respalda el análisis de la variabilidad en la luz medida entre filas mediante céptometro.

Además, en el estudio de Kirimura *et al.*, 2022 con espinaca y col rizada bajo paneles solares, se registraron diferencias significativas en la intercepción de PAR entre tratamientos, afectando directamente la eficiencia en el uso de la radiación (RSRUE). Esta eficiencia fue mayor en tratamientos con menor intercepción de PAR, resultado que puede relacionarse con lo observado en borraja, donde las diferencias entre filas reflejan una variabilidad en la captación de luz que influye en el comportamiento fisiológico.

Aunque en este trabajo no se observan cambios drásticos, los resultados obtenidos con el céptometro refuerzan la idea de que las estructuras agrivoltaicas generan un patrón dinámico de sombra-luz, con implicaciones potenciales en la eficiencia fotosintética y, por tanto, en la productividad de los cultivos. Estos datos, además, permiten caracterizar con precisión el microambiente lumínico en cada fila, lo cual es clave para interpretar de forma integrada los resultados de SPAD y fluorescencia.

El artículo de Magarelli *et al.*, 2024 proporciona una revisión crítica sobre los efectos de los sistemas agrivoltaicos en cultivos frutales, con especial atención a la distribución de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en función del diseño y disposición de los paneles solares. Aunque el estudio se centra en frutales, muchos de los conceptos pueden extrapolarse a cultivos hortícolas como los evaluados en este trabajo, dado que los mecanismos fisiológicos asociados a la captación de luz y la fotosíntesis son comunes.

Uno de los aspectos más relevantes es la comparación entre diferentes configuraciones de módulos (estáticos, con seguimiento solar y seguimiento agronómico), observándose que los sistemas con paneles opacos y baja transparencia generan patrones de sombra altamente heterogéneos. En contraste, los módulos semitransparentes o con seguimiento logran una distribución de PAR más uniforme, lo que favorece la eficiencia fotosintética del cultivo. Estos resultados coinciden con las variaciones observadas entre filas en los cultivos de borraja y acelga bajo estructuras agrivoltaicas, donde la distribución de luz medida con el céptometro presentó cierta variabilidad entre ubicaciones, especialmente a lo largo del día.

El artículo también destaca que niveles de sombreado superiores al 30% pueden comprometer la fotosíntesis y la acumulación de materia seca, afectando el rendimiento y la calidad de los frutos. Este umbral puede servir como referencia para interpretar si las reducciones de PAR observadas en nuestro ensayo podrían tener implicaciones fisiológicas en cultivos de ciclo corto como los hortícolas, particularmente en condiciones de sombra prolongada o mal distribuida.

Además, se mencionan efectos como el aumento del área foliar específica bajo sombreado, una adaptación fisiológica a menor disponibilidad lumínica, que también puede relacionarse con una mayor concentración de clorofila (y por tanto valores SPAD más altos). Por ello, este artículo refuerza la interpretación conjunta de los datos de SPAD y céptometro, al demostrar cómo ambos parámetros responden al mismo estímulo ambiental: la luz.

Rodríguez *et al.*, 2023 destacaron una respuesta adaptativa del índice de área foliar bajo condiciones de estrés hídrico, interpretada como un mecanismo para mejorar la captación de luz en entornos limitantes. Este tipo de plasticidad fisiológica resulta comparable a la variabilidad observada en este estudio en cultivos como borraja y acelga, donde la incidencia lumínica diferencial entre filas también parece haber inducido ajustes morfológicos orientados a optimizar la eficiencia fotosintética.

Asimismo, el trabajo subraya la correlación entre NDVI, IAF y la radiación interceptada, lo cual apoya el uso del céptometro como herramienta eficaz para evaluar la heterogeneidad lumínica bajo condiciones de cultivo agrivoltaico.

Aunque el estudio de Tang *et al.*, 2023 no incluyó mediciones directas de radiación fotosintéticamente activa (PAR), sus resultados reflejan los efectos fisiológicos del sombreado moderado (30 %) sobre parámetros de fluorescencia y fotosíntesis neta. Estas respuestas coinciden con las observadas en este trabajo, donde el uso del céptometro permitió detectar diferencias horarias y espaciales en la intercepción de luz. La similitud en los patrones de adaptación sugiere que incluso niveles moderados de sombra, como los generados por estructuras agrivoltaicas, pueden inducir ajustes funcionales en la eficiencia del uso de la luz.

Estos resultados refuerzan las interpretaciones obtenidas mediante céptometro en el presente trabajo, donde se detectaron diferencias horarias y entre filas en la intercepción de luz. La similitud de respuestas fisiológicas ante variaciones en la radiación sugiere que incluso niveles moderados de sombra, como los generados por estructuras agrivoltaicas, pueden inducir ajustes significativos en la eficiencia fotosintética.

La tesis de Díaz Vázquez, 2012 muestra que distintas especies agrícolas presentan respuestas contrastadas ante la reducción de radiación solar, lo que pone de manifiesto su capacidad de adaptación a entornos lumínicos variables. Esta variabilidad también se refleja en los resultados del presente estudio, donde los cultivos evaluados respondieron de forma diferencial a las condiciones de sombra, evidenciando distintos niveles de plasticidad fisiológica dentro del sistema agrivoltaico.

Estos hallazgos refuerzan la interpretación de los datos obtenidos con el céptometro en este estudio, al confirmar que variaciones en la intensidad y distribución de la radiación (aunque no medidas con el mismo aparato) pueden explicar diferencias en el desarrollo y fisiología de los cultivos bajo estructuras agrivoltaicas.

Ukwu *et al.*, 2023 concluyeron que la reducción en la transmitancia espectral de los materiales fotovoltaicos puede afectar negativamente el desarrollo de los cultivos, al limitar la captación de radiación fotosintéticamente activa (PAR). Estos resultados son coherentes con lo observado en este trabajo mediante céptometro, donde las diferencias en la intercepción de luz entre tratamientos reflejan el impacto del sombreado en la disponibilidad energética para la planta, especialmente en situaciones de sombra más intensa o mal distribuida.

Estos hallazgos coinciden con las mediciones realizadas mediante céptometro en este trabajo, donde se observó una fuerte influencia de la radiación incidente sobre el desarrollo morfológico en hortícolas reforzando así la interpretación de que incluso ligeras modificaciones en la cantidad y calidad del PAR pueden inducir ajustes fisiológicos relevantes para la productividad vegetal.

La tesis de Arenas Corraliza, 2022 evidenció que la sombra en sistemas agroforestales puede tener efectos variables sobre el rendimiento de los cultivos, dependiendo de las condiciones ambientales. Este enfoque resalta la importancia del contexto climático en la interpretación de los efectos del sombreado, algo también observado en este estudio, donde la captación de PAR y la respuesta fisiológica de los cultivos variaron según la distribución espacial de la sombra dentro del sistema agrivoltaico.

Estas observaciones coinciden con los resultados obtenidos en este trabajo mediante céptometro, que mostraron una modulación de la respuesta fisiológica en función de la intercepción de PAR. El documento subraya además que la sombra, lejos de ser siempre negativa, puede actuar como factor de protección ante estrés térmico o hídrico, lo cual apoya el potencial del AV como herramienta de adaptación climática.

### 5.1.3. FLUORÍMETRO.

El análisis de la eficiencia fotosintética mediante fluorimetría permite una caracterización más detallada del estado fisiológico de las plantas ante condiciones de estrés, como las inducidas por el sombreado.

Tang *et al.*, 2023 destacaron que el sombreado puede inducir modificaciones en los parámetros de fluorescencia relacionados con la eficiencia del fotosistema II y la disipación energética. Estas respuestas fisiológicas reflejan mecanismos de adaptación frente a la baja disponibilidad lumínica, como los observados también en este trabajo, donde algunos tratamientos de sombra mostraron indicios de reconfiguración funcional en el aparato fotosintético, posiblemente orientada a optimizar el uso de la energía absorbida y minimizar el estrés fotooxidativo.

Estos datos permiten contextualizar los resultados obtenidos en este trabajo con el fluorímetro, en los que también se observó variabilidad en  $F_v/F_m$ ,  $F_o/F_m$  y  $\Phi(P_o)$  en función de la fila y la hora del día. La disminución de  $F_v/F_m$  en determinadas filas y momentos puede deberse a un exceso o defecto de radiación incidente, afectando la eficiencia del fotosistema II, tal como se ha descrito en condiciones de sombreado moderado en frutales.

Ukwu *et al.*, 2023 mostraron que una menor transmitancia de luz puede modificar significativamente la eficiencia fotosintética, al mejorar el rendimiento cuántico del PSII y reducir las pérdidas energéticas no fotoquímicas. Estas observaciones son coherentes con las tendencias registradas en este trabajo, donde los tratamientos de sombra moderada también reflejaron posibles mecanismos de optimización en el uso de la luz disponible, lo que refuerza la hipótesis de una adaptación funcional del aparato fotosintético en condiciones de radiación atenuada.

Este patrón refuerza las observaciones realizadas con el fluorímetro en este trabajo, donde los cultivos hortícolas mostraron una mayor eficiencia cuántica en condiciones de sombra moderada, como las filas más protegidas del invernadero agrivoltaico. También se observó una disminución de  $Y(NO)$  en plantas bajo OPV y RF, lo cual se relaciona con un menor daño por exceso de luz en los centros de reacción del PSII, comportamiento análogo al registrado en este ensayo.

Ukwu *et al.*, 2025 destacaron que el sombreado generado por estructuras agrivoltaicas puede mejorar la eficiencia del fotosistema II, reduciendo las pérdidas energéticas no fotoquímicas y el estrés fotooxidativo. Estas conclusiones coinciden con algunas de las respuestas fisiológicas detectadas en este estudio, donde los tratamientos de sombra también sugieren un uso más eficiente de la energía luminosa disponible y una adaptación funcional del aparato fotosintético bajo condiciones de menor radiación.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en este trabajo, donde las hojas de acelga, borraja y puerro también mostraron cambios significativos en  $F_v/F_m$ ,  $F_o/F_m$  y  $\phi(Po)$  bajo condiciones de diferente intercepción de luz. Especialmente relevante es la reducción del estrés lumínico medido como  $Y(NO)$  y la mejora de  $Y(II)$ , lo que apoya el potencial del AV para mejorar la eficiencia del PSII en ambientes cálidos y con alta radiación.

Jamil *et al.*, 2024 observaron que niveles intermedios de transmitancia lumínica en sistemas agrivoltaicos no alteraron significativamente la eficiencia del fotosistema II, lo que indica una buena tolerancia del cultivo a condiciones de sombra moderada. Este patrón coincide con las observaciones realizadas en este estudio, donde parámetros como  $F_v/F_m$  se mantuvieron estables bajo tratamientos de sombra, sugiriendo que el rendimiento fotosintético puede preservarse incluso en ambientes con radiación atenuada.

Estos hallazgos refuerzan las observaciones realizadas en este trabajo mediante fluorímetro, donde especies como acelga o borraja presentaron variaciones significativas en  $F_v/F_m$  y  $F_o/F_m$  en función de la exposición lumínica. El artículo de Jamil *et al.* valida que una configuración adecuada de transparencia en módulos AV puede mantener el funcionamiento fotosintético sin comprometer la productividad.

Arenas Corraliza, 2022 observó que determinados cultivos, como la cebada, pueden aclimatarse funcionalmente a condiciones de sombra mediante ajustes fisiológicos que mantienen estable su rendimiento fotosintético. Esta capacidad de adaptación también se refleja en los resultados de este trabajo, donde ciertos parámetros fluorescentes se mantuvieron sin alteraciones relevantes bajo sombra

moderada, lo que sugiere una reconfiguración eficiente del aparato fotosintético ante la reducción de radiación incidente.

Estas adaptaciones se alinean con los resultados obtenidos en este trabajo, donde especies hortícolas como acelga o borraja mostraron una respuesta diferencial en  $F_v/F_m$  y  $\phi_i(P_o)$  dependiendo de la distribución de la radiación, lo cual sugiere mecanismos de aclimatación similares en distintos tipos de cultivo bajo estructuras agrivoltaicas.

#### 5.1.4. PLANTAS AROMÁTICAS.

El estudio de plantas aromáticas cultivadas bajo condiciones agrivoltaicas ofrece una oportunidad única para analizar no solo el rendimiento en biomasa, sino también la calidad y composición de sus aceites esenciales. Este apartado de discusión compara los resultados obtenidos en este ensayo con estudios previos en especies aromáticas o afines, teniendo en cuenta factores como la fenología, el manejo poscosecha, la composición química y el rendimiento volumétrico.

A continuación, se presentan los resultados interpretados para cada una de las especies evaluadas en este trabajo: salvia, orégano, menta y ajeno, contrastándolos con la literatura científica disponible.

##### 5.1.4.1. *Salvia*.

Vacacela Ajila *et al.*, 2023 identificaron compuestos como (E)-cariofileno,  $\alpha$ -humuleno y germacreno D en los aceites esenciales de *Melinis minutiflora* y *Lantana camara*, algunos de los cuales también se detectaron en *Salvia officinalis* en este estudio. La coincidencia en el perfil químico entre especies sugiere que ciertos sesquiterpenos podrían estar asociados a funciones bioactivas comunes, como las propiedades antiinflamatorias, acaricidas o antitumorales descritas en la literatura. Estos compuestos, aunque presentes en menor proporción, podrían contribuir a las características funcionales de la salvia cultivada bajo condiciones agrovoltaicas, reforzando el interés por su uso en sistemas productivos sostenibles.

##### 5.1.4.2. *Menta*.

Aunque el estudio de Mejía *et al.*, 2007 se centró en *Lippia alba*, sus conclusiones sobre el impacto del manejo agronómico y poscosecha en la producción y composición del aceite esencial son extrapolables a otras especies, como la menta. Los autores destacan que factores como la frecuencia de corte, la altura de cosecha y el estado del material vegetal influyen notablemente en el rendimiento y la calidad del aceite. Esta interpretación coincide con los resultados de este estudio, donde se observaron variaciones entre campañas que podrían estar asociadas a diferencias en las condiciones ambientales y prácticas de manejo,

reforzando la importancia de optimizar estos factores para obtener aceites esenciales de mayor valor funcional.

#### 5.1.4.3. Orégano.

En este estudio, el orégano mostró una mayor producción de biomasa y una concentración más elevada de carvacrol en la campaña de 2024, especialmente en la parcela con orientación este. Este comportamiento podría explicarse por la mayor proporción floral y las condiciones ambientales más cálidas y secas, que habrían favorecido tanto el crecimiento como la síntesis de compuestos fenólicos.

Resultados similares fueron reportados por Vogel *et al.*, 1996, quienes destacaron que la fase de plena floración coincide con el máximo contenido de aceites esenciales y fenoles como carvacrol y timol. Además, señalaron que flores y brácteas concentran la mayor parte de estos compuestos, lo que coincide con la calidad del aceite obtenida en las campañas con mayor desarrollo floral.

#### 5.1.4.4. Ajenjo.

Aunque este trabajo no incluyó directamente el cultivo de *Shinus molle*, los resultados de Castro Quispe, 2018 muestran que el procesamiento poscosecha, especialmente el tiempo y método de secado, puede influir significativamente en el rendimiento y características del aceite esencial. Esta tendencia también se observó en el caso del ajeno, donde la cantidad final de aceite pareció depender en parte del estado de la materia prima y de las condiciones de secado aplicadas. Ambos estudios refuerzan la idea de que pequeñas variaciones en el manejo posterior a la cosecha pueden tener un impacto considerable en la productividad de especies aromáticas.

## 6. CONCLUSIÓN

Este Trabajo de Fin de Grado ha permitido evaluar de manera exhaustiva los efectos de la agrivoltaica sobre diferentes cultivos hortícolas y plantas aromáticas bajo condiciones simuladas de sombreado parcial. La metodología implementada, basada en estructuras que imitan los efectos de paneles fotovoltaicos, ha proporcionado información valiosa sobre cómo los cultivos responden a una reducción controlada de la radiación incidente, destacando la importancia crítica del diseño específico del sistema agrivoltaico para optimizar simultáneamente la producción agrícola y energética.

En los cultivos hortícolas analizados (acelga, puerro y borraja), a pesar de ciertas limitaciones metodológicas derivadas de accesos restringidos y reducción en el número de repeticiones, se han podido identificar patrones claros de adaptación fisiológica y productiva al sombreado. Estos resultados subrayan la capacidad adaptativa de estas especies, aunque se reconoce la necesidad de profundizar en

futuras investigaciones para consolidar estas conclusiones y explorar plenamente su potencial productivo en condiciones agrivoltaicas.

En contraste, el análisis realizado en plantas aromáticas: salvia, orégano, menta y ajeno, ha demostrado una mayor robustez y claridad en los resultados, gracias a un seguimiento más exhaustivo y continuado. Estas especies mostraron una notable plasticidad fisiológica y bioquímica ante las condiciones de sombreado parcial, observándose variaciones significativas en la biomasa, fluorescencia clorofílica y composición de aceites esenciales. De manera especial, la presencia predominante de carvacrol en orégano, destacada en este estudio y respaldada por literatura científica previa, sugiere un potencial valor añadido considerable para esta especie en sistemas agrivoltaicos.

Los resultados obtenidos enfatizan la relevancia de la agrivoltaica como estrategia prometedora para compatibilizar la generación de energías renovables con una agricultura sostenible y adaptada al cambio climático. Este enfoque innovador ofrece soluciones viables para mitigar impactos negativos asociados al estrés hídrico y térmico en diferentes cultivos, optimizando además el uso eficiente de la tierra y contribuyendo positivamente a la sostenibilidad medioambiental y económica.

Cabe destacar que, a pesar de las dificultades mencionadas, los objetivos planteados al inicio de este trabajo (tanto el objetivo general como los específicos) han sido alcanzados en su totalidad, permitiendo obtener una visión global y fundamentada sobre los efectos del sombreado en los parámetros fisiológicos, productivos y bioquímicos de los cultivos analizados.

Finalmente, este estudio sienta bases sólidas para futuras líneas de investigación en agrivoltaica, alentando a explorar nuevas configuraciones experimentales que permitan maximizar el rendimiento agrícola y energético de forma conjunta. Los resultados aportados constituyen un paso significativo hacia modelos productivos más integrados, resilientes y sostenibles, que contribuyan a enfrentar eficazmente los desafíos energéticos, ambientales y alimentarios del siglo XXI.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Abella, M. A., Polo, J., & Martín, L. (2023). Angular effects of pyranometers in the measurement of solar irradiance on horizontal and tilted surfaces. *Solar Energy* 74(6), 467–478.
- Abidin, M. A. Z., Mahyuddin, M. N., & Zainuri, M. A. A. M. (2021). Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13147846>

- Alparslan, M., Tarımsal, Ü., Ve Teknolojileri, Ü., Cilt, D., & Turan, N. (2021). Agrivoltaics and Their Effects on Crops: A review. In *Journal of Muş Alparslan University Agricultural Production and Technologies* (Vol. 2, Issue 2).
- Alshaibani, K. K. (2016). A new sky clearness and brightness classification method based on horizontal global and diffuse illuminance. *Solar Energy* 132, 310–320.
- Amaducci, S., Yin, X., & 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>
- Appelbaum, J., Bany, J., & Bany, S. (2019). Anisotropic diffuse radiation models for photovoltaic fields with multiple rows. *Solar Energy* 181, 282–294.
- Arenas Corraliza, M. G. (2022). *Respuesta de variedades de trigo (Triticum aestivum L.) y cebada (Hordeum vulgare L.) al cultivo bajo arbolado en sistemas agroforestales mediterráneos.*
- Asa'a, S., Reher, T., Rongé, J., Diels, J., Poortmans, J., Radhakrishnan, H. S., van der Heide, A., Van de Poel, B., & Daenen, M. (2024). A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 200). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114515>
- Ayala-Tafoya, F., María Zatarain-López, D., Valenzuela-López, M., Partida-Ruvalcaba, L., de Jesús Velázquez-Alcaraz, T., Díaz-Valdés, T., & Osuna-Sánchez, J. A. (2011). *Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra.*
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Beltrán, L. O. (2023). Natural lighting technologies for deep spaces: Performance of horizontal light pipes. *Lighting Research & Technology* 55(1), 3–20.
- Blanco, M., Hanrieder, N., Kujawa, A., & Wilbert, S. (2023). *2023.Estado de la Agrivoltaica.*
- Brito, M. C., Redweik, P., & Freitas, S. (2022). Uncertainty in the estimation of solar resource for photovoltaic applications: Influence of the angle of incidence and diffuse fraction. *Renewable Energy* 181, 687–698.

- Campana, P. E., Widen, J., & Zhang, J. (2022). High-resolution modeling of light and shade distribution in agrivoltaic systems: Implications for crop yield and energy performance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109039.
- Cassanta Vidotto, L., Schneider, K., Weinz Morato, R., Pena Temer Martins Ribeiro, M., do Nascimento, L., & R  ther, R. (2024). *SISTEMAS AGRIVOLTAICOS NA AGRICULTURA FAMILIAR: ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONOMICA*. <https://www.pv-tech.org/top-50-most-bankable-module-suppliers-in-the-pv-industry-today/>
- Castro Quispe, B. G. (2018). *Rendimiento de aceites esenciales de *Shinus molle* L. según tiempo de secado solar, de los frutos, La Mejorada-Huancavelica*.
- Cavaco, M., Brito, M. C., & Redweik, P. (2016). Solar resource assessment in southern Portugal: Long-term analysis and spatial variability. *Renewable Energy* 99, 1292–1303.
- Chalgynbayeva, E., Campana, P. E., & Zhang, J. (2023). Short-term prediction of microclimate and crop yield in agrivoltaic systems using high-resolution models. *Agricultural and Forest Energy*, 323, 109039.
- Clandestino Muñoz, F. V. (2020). *GENERACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS AGROVOLTAICOS BIFACIALES EN EL VALLE DE LLUTA*.
- Cossu, M., Tiloca, M. T., Cossu, A., Deligios, P. A., Pala, T., & Ledda, L. (2023). Increasing the agricultural sustainability of closed agrivoltaic systems with the integration of vertical farming: A case study on baby-leaf lettuce. *Applied Energy*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121278>
- Dal Pr  , A., Dainelli, R., Santoni, M., Lanini, G. M., Di Serio, A., Zanotti, D., Greco, A., & Ronga, D. (2025). Impact of Different Shading Conditions on Processing Tomato Yield and Quality Under Organic Agrivoltaic Systems. *Horticulturae*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030319>
- Díaz Vázquez, S. G. (2012). *EFECTO DE LA RADIACIÓN EN EL*.
- Disciglio, G., Frabboni, L., Tarantino, A., & Stasi, A. (2023). *Association between Dynamic Agricoltaic System and Cultivation: Medical Plants Viability, Yields and Qualitative Assessment*. <https://doi.org/10.20944/preprints202302.0262.v1>
- 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 agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>

- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>
- European Parliament. (2025). *EU Solar Energy Strategy*.
- Ferrara, G., Boselli, M., Palasciano, M., & Mazzeo, A. (2023). Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.). *Scientia Horticulturae*, 308, 111595. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.111595>
- Forestalia. (2022). *Proyectos Forestalia*.
- Fraunhofer Chile. (2018). *Agro PV: Sombra de paneles fotovoltaicos aumenta la eficiencia del riego*.
- Garcin, M., Campana, P. E., & Zhang, J. (2022). 3D modeling of light distribution and crop yield in agrivoltaic systems: Sensitivity to system design and weather conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109039.
- Hofmann, M., & Seckmeyer, G. (2017). Impact of diffuse horizontal irradiance on the performance of photovoltaic systems. *Solar Energy* 144, 627–635.
- Honsberg, G., Leilaieoun, M., & Haegel, N. (2022). Pathways to ultra-high efficiency solar cells. *Nature Communications*, 13, 620.
- Jamil, U., Rahman, M., Hayibo, K. S., Alrayes, L., Fordjour, E., Thomas, R., & Pearce, J. M. (2024). *Impacts of transparency in agrivoltaics lettuce cultivation using uniform or non-uniform semitransparent solar photovoltaic modules*. <https://ssrn.com/abstract=4954023>
- Jung, J., Kang, J., & Lee, S. (2021). Economic and microclimatic synergies in agrivoltaic systems: A case study. *Renewable Energy* 179, 1432–1443.
- Jung, J., Kang, J., & Lee, S. (2024). Impact of agrivoltaic systems on microclimate and crop performance in horticultural environments. *Renewable Energy* 214, 118–130.
- Khudhair, M. A., Sahib, M. R., & AL-Agele, H. A. (2025). Interactive Effects of Agrivoltaic Shading, Irrigation, and Biofertilizers on the Chemical Composition of Lettuce Leaves (*Lactuca sativa* L.). *Indonesian Journal on Health Science and Medicine*, 2(1). <https://doi.org/10.21070/ijhsm.v2i1.56>
- Kirimura, M., Takeshita, S., Matsuo, M., Zushi, K., Gejima, Y., Honsho, C., Nagaoka, A., & Nishioka, K. (2022). Effects of Agrivoltaics (Photovoltaic Power Generation Facilities on Farmland) on Growing Condition and Yield of

- Komatsuna, Mizuna, Kabu, and Spinach. *Environmental Control in Biology*, 60(2), 117–127. <https://doi.org/10.2525/ecb.60.117>
- Kocifai, M., Solano Lamphar, H. A., & Kundracik, F. (2015). Modeling the relationship between zenith sky brightness and horizontal illuminance under various atmospheric conditions. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 151, 52–59.
- Kong, S., & King, J. (2013). Modeling and measurement of global and diffuse illuminance under different sky conditions. *Building and Environment* 59, 662–671.
- Kwon, O., Kim, M., & Lee, J. (2023). Effects of agrivoltaic system design on light homogeneity and electrical performance: A simulation study. *Renewable Energy* 199, 1234–1242.
- Lee, H. J., Park, H. H., Kim, Y. O., & Kuk, Y. I. (2022). Crop Cultivation Underneath Agro-Photovoltaic Systems and Its Effects on Crop Growth, Yield, and Photosynthetic Efficiency. *Agronomy*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy12081842>
- Li, D., Lau, C., & Lam, T. (2004). A simplified daylight illuminance model for inclined surfaces under all sky conditions. *Building and Environment* 39(7), 743–752.
- Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, X., & Wu, X. (2018). Factors influencing leaf chlorophyll content in natural forests at the biome scale. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6(JUN). <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>
- Lightsoruce BP. (2024). *Vendimia Aragón*.
- López Luque, R., Fernández de Ahumada, L. M., Gallego Rodríguez, P., Gómez Uceda, F. J., Muñoz Peinado, J., Fernández García, P., Pulido Mancebo, J. S., Ramírez Faz, J. C., & Varo Martínez, M. M. (2023). *INFORME 2023 PROSPECTIVO SOBRE LA SITUACIÓN DE LA ENERGÍA AGRIVOLTAICA*. <https://cpage.mpr.gob.es/>
- Ma, Lu., Wang, Y., & Zhang, J. (2022). Efficiency of indirect photosynthetically active radiation (PAR) for canopy photosynthesis in agrivoltaic systems. *Field Crops Research*, 285, 108610.
- Magarelli, A., Mazzeo, A., & Ferrara, G. (2024). Fruit Crop Species with Agrivoltaic Systems: A Critical Review. In *Agronomy* (Vol. 14, Issue 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agronomy14040722>

- Majumdar, D., & Pasqualetti, M. J. (2018). Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landscape and Urban Planning*, 170, 150–168.  
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.011>
- Mamun, M. A. Al, Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., & Aziz, A. A. (2022). A review of research on agrivoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 161). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>
- Mejía, O., Marcial, J., Sánchez O, M. S., Bonilla C, C. R., & Vanegas M, P. (2007). *EFFECTO DE LA ALTURA Y FRECUENCIA DE CORTE Y SECADO EN EL RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL ACEITE ESENCIAL DE PRONTO ALIVIO*.
- Michalsky J.J. (2007). A standard for the global shortwave irradiance on a horizontal surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24(12), 1924–1932.
- Min, S. Y., Kim, B. M., Yun, H. K., Jung, J. H., & Oh, W. (2022). Effects of Environmental Changes by an Agrivoltaic System on Growth and Quality Characteristics of Kimchi Cabbage. *Journal of People, Plants, and Environment*, 25(6), 659–667. <https://doi.org/10.11628/ksppe.2022.25.6.659>
- Mohelníková, J., & Pelech, O. (2004). Annual diffuse horizontal illuminance and its significance for daylighting in buildings. *Energy and Buildings*, 291, 113349.
- Nakamura, H., Murakami, H., & Yamaguchi, Y. (1985). Studies on the evaluation method of sky conditions for daylight desing. *Journal of Architecture and Building Science (Japan)* 100(1247), 45–52.
- Nguyen, A. T., & Solovyov, D. (2018). Annual variability of global horizontal illuminance in tropical and temperate regions. *Energy and Buildings* 173, 1–10.
- Pascaris, A. S., Schelly, C., Rouleau, M., & Pearce, J. M. (2022). Do agrivoltaics improve public support for solar? A survey on perceptions, preferences, and priorities. *Green Technology, Resilience, and Sustainability*, 2(1).  
<https://doi.org/10.1007/s44173-022-00007-x>
- Poonia, S., Santra, P., Jat, N. K., Meena, H. M., & Jain, D. (2020). *Agri-voltaic System: A Sustainable Approach for Enhancing Farm Income in Arid Western Regions of India*. [www.popularkheti.com](http://www.popularkheti.com)
- Potenza, E., Croci, M., Colauzzi, M., & Amaducci, S. (2022). Agrivoltaic System and Modelling Simulation: A Case Study of Soybean (*Glycine max L.*) in Italy. *Horticulturae*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121160>

- Prá, A. D., Piccini, A. F., Cartechini, L., Caruso, G., & Giagnacovo, G. (2023). Agrivoltaics: An opportunity for sustainable agriculture in Mediterranean areas. *Agronomy*, *13*(2), 465.
- PV Magazine. (2021, April 30). *Organizaciones alemanas esbozan nuevas normas para la agrivoltaica*.
- Rodríguez, J. F. B., Prieto, J. C., Moya, E. S., Ramirez, L. L., Figueroa, S. S. G., Bueno, A. M., López, H. C. C., & Vázquez, A. J. G. (2023). EFFECT OF WATER STRESS ON YIELD, CLOROPHYLL AND BIOMASS IN WHEAT. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *46*(3), 245–254. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.3.245>
- Sainz de Murieta Mangado, J. A., Burgos, A., Pedroza Ochoa, A., Villena Camarero, U., & Alvarez Gutierrez, M. L. (2024). Sistemas Agrivoltaicos. *Jornadas de Automática*, *45*. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10922>
- Shekari, H., & Golmohammadi. (2009). Evaluation of the IESNA model for daylight illuminance prediction. *Lighting Research and Technology* *41*(3), 243–252.
- Sliney, D. H. (2019). Measurement of horizontal and vertical illuminance for exposure assessment: Relevance to human visual field. *Photochemistry and Photobiology* *95*(2), 363–370.
- Soto-Gómez, D. (2024). Integration of Crops, Livestock, and Solar Panels: A Review of Agrivoltaic Systems. In *Agronomy* (Vol. 14, Issue 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agronomy14081824>
- Tang, W., Chen, C., Zhang, Y., Chu, Y., Yang, W., Cui, Y., Kou, G., Chen, H., Song, H., & Gong, R. (2023). Effect of Low-Light Stress on Sugar and Acid Accumulation during Fruit Development and Ripening of Sweet Cherry. *Horticulturae*, *9*(6). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060654>
- Teramoto, E., & Escobedo, J. F. (2012). Classification of sky conditions using a new model of global solar radiation on tilted surfaces. *Solar Energy* *86*(6), 1713–1721.
- Torres-Bojorques, A. I., Morales-Maza, A., Núñez-Ramirez, F., & Cervantes-Díaz, L. (2017). Utilización de acolchado plástico y aplicación de hierro foliar en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivado en malla sombra infectado con virus. *Acta Universitaria*, *27*(5), 3–10. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1333>
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., & Oberfell, 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://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- Ukwu, U. N., Agbo, J. U., Muller, O., Schrey, S., Nedbal, L., Niu, Y., Meier-Grüll, M., & Uguru, M. (2023). Effect of organic photovoltaic and red-foil transmittance on yield, growth and photosynthesis of two spinach genotypes under field and greenhouse conditions. *Photosynthesis Research*, 157(2–3), 103–118.  
<https://doi.org/10.1007/s11120-023-01028-8>
- Ukwu, U. N., Muller, O., Meier-Grüll, M., & Uguru, M. I. (2025). Agrivoltaics shading enhanced the microclimate, photosynthesis, growth and yields of vigna radiata genotypes in tropical Nigeria. *Scientific Reports*, 15(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-84216-3>
- Unión Española Fotovoltaica (UNEF). (2023). *SINERGIA ENTRE LA ACTIVIDAD AGROPECUARIA Y LA FOTOVOLTAICA: PROMOVRIENDO LA BIOAGROVOLTAICA*.
- Vacacela Ajila, W., Guzmán Ordóñez, L., Rey Valeirón, C., Delgado Fernández, E., Benítez Gonzales, E., Chamba Ochoa, H., Ortega Rojas, R., & Ramírez Robles, J. (2023). Chemical composition and review of the acaricidal properties of the essential oils of *Melinis minutiflora* and *Lantana camara*. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 22(4), 488–499. <https://doi.org/10.37360/blacpma.23.22.4.36>
- Velarde, E., Rondan, G., & Mendoza, J. (2023). Impact of an Agrovoltaic System on the Yield and Growth of Saladette Tomato Crops (*Lycopersicon esculentum* Mill) in a Semi-Arid Climate, Arequipa-Peru. *In 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*.  
<https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1284>
- Veselinovic, A., Mikulovic, J., & Durisic, Z. (2016). Impact of cloudiness on direct and diffuse components of horizontal solar irradiation. *2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/EFEA.2016.7748796>
- Vignola, F., Michalsky, J., & Stoffel, T. (2012). *Solar and Infrared Radiation Measurements*.
- Vogel, H., Muñoz, J., & Razmilic, I. (1996). *Efecto de la época de cosecha sobre el rendimiento de producto deshidratado y de aceite esencial en orégano (Origanum vulgare L.)*.
- Wang, H. X., Muñoz-García, M. A., Moreda Cantero, G. P., & Molina López, I. (2019). *Simulación del uso compartido del terreno agrícola por paneles solares fotovoltaicos y cultivo*.

- Warmann, E., Jenerette, G. D., & Barron-Gafford, G. A. (2024). Agrivoltaic system design tools for managing trade-offs between energy production, crop productivity and water consumption. *Environmental Research Letters*, 19(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2ab8>
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). *Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate*. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y/Published>
- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020a). Combining photovoltaic modules and food crops: first agrovoltaic prototype in Belgium. In *Renewable Energy and Power Quality Journal*.
- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020b). *TECHNO-ECONOMIC STUDY OF AGROVOLTAIC SYSTEMS FOCUSING ON ORCHARD CROPS*.
- Zainali, S., Ma Lu, S., Stridh, B., Avelin, A., Amaducci, S., Colauzzi, M., & Campana, P. E. (2023). Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts. *Applied Energy*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120981>
- Zainol Abidin, S. N., Zaini, N., & Othman, M. Y. (2021). A review on agrivoltaics system: Dual harvesting of solar energy and crops. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 12(2), 1152–1162.



**ANEJO A. DATOS CROMATOGRAFÍAS PLANTAS AROMÁTICAS.**

(% ) Composición química aceite esencial										
Especie de cultivo PAM	Nombre del compuesto	Tratamiento								
		Soleado			Sombra-Soleado			Sombra completa		
		2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
<i>Salvia officinalis L.</i>	(E)- $\beta$ -caryophyllene	0,68	4,2	2,41	1	4,79	-	1,65	5,23	-
	1,8-cineole	11,3	18,7	16,98	9,12	16,3	-	4,16	17,7	-
	Borneol	2,48	3,63	2,30	2,04	4,1	-	3,38	4,75	-
	Camphene	4,06	1,95	1,19	4,3	1,84	-	6,49	2,68	-
	Camphor	18	4,02	1,88	14,8	4,96	-	16,3	7,51	-
	Manool	0,9	1,59	2,94	1,93	1,84	-	4,8	1,3	-
	Viridiflorol	1,57	5,41	8,15	2,35	4,78	-	7,11	5,09	-
	$\alpha$ -pinene	4,12	4,11	2,76	5,62	4,11	-	8,5	4,75	-
	$\alpha$ -thujone	<b>37,9</b>	<b>25,6</b>	<b>21,52</b>	<b>38,8</b>	<b>27,5</b>	-	<b>21,2</b>	<b>22,8</b>	-
	$\beta$ -pinene	2,53	3,46	5,93	2,38	4,07	-	2,8	3,93	-
	$\beta$ -thujone	7,37	12,2	11,28	5,94	11,4	-	5,95	10,7	-
<b>Total</b>	<b>90,9</b>	<b>84,88</b>	<b>77,35</b>	<b>88,3</b>	<b>85,64</b>	-	<b>82,4</b>	<b>86,5</b>	-	

Tabla A. 1. Datos cromatografía *Salvia Officinalis L.*

(% ) Composición química aceite esencial										
Especie de cultivo PAM	Nombre del compuesto	Tratamiento								
		Soleado			Sombra-Soleado			Sombra completa		
		2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
<i>Origanum vulgare subsp. virens</i>	Bicyclogermacrene	0,86	3,85	1,46	0,86	2,11	2,03	0,79	4,07	1,84
	Borneol	0,81	1,3	0,36	0,75	0,93	0,42	0,93	1,37	0,35
	Carvacrol	4,98	0,53	5,24	3,31	1,18	0	5,3	0,69	28,9
	Caryophyllene oxide	1,09	1,61	0,21	0,95	1,81	0,33	0,7	1,47	0,25
	Germacrene D	1,59	4,38	2,32	1,34	3,35	2,77	1,35	4,97	2,27
	Linalool	11,9	2,09	18,4	4,51	3,01	17	10,3	8,09	1,12
	Myrcene	2,22	5,01	1,38	1,39	1,79	1,27	1,84	2,8	1,48
	Sabinene	0,57	1,95	0,33	0,44	1,64	0,83	0,38	0,69	0,29
	Thymol	9,77	0,69	<b>16,3</b>	12,2	0,87	<b>22,3</b>	8,65	3,75	<b>3,82</b>
	Thymol methyl ether	1,02	3,92	1,27	1,95	4,61	1,27	1,13	4,09	0,29
	carvacrol methyl ether	5,31	6,07	3,66	0	5,27	2,04	5,28	2,39	10
	spathulenol	0	3,04	0,33	4,11	2,89	0,44	0	2,77	0,43
	(E)- $\beta$ -caryophyllene	2,23	0	2,45	2,55	0	5,14	2,08	0	2,36
	(E)- $\beta$ -ocimene	1,06	2,08	0	1,02	2,85	0	1,58	1,94	0
	(Z)- $\beta$ -ocimene	2,04	8,36	0	3,06	8,97	0	3,1	8,85	0
	$\alpha$ -terpinene	1,98	1,7	3,34	2,47	1,81	3,03	2,49	2,13	3,45
	$\alpha$ -thujene	1,37	0,97	1,24	1,66	1,11	1,29	1,61	0,87	1,43
	$\beta$ -bisabolene	1,61	0,67	0,99	1,68	0,72	0,97	1,04	0,83	0,9
	$\beta$ -caryophyllene	0	5,28	0	0	5,24	0	0	5,24	0
	$\gamma$ -terpinene	18	<b>21,6</b>	<b>22,8</b>	21,9	<b>21,3</b>	<b>20,3</b>	21,3	<b>22,8</b>	<b>24,9</b>
$p$ -cymene	<b>25,9</b>	12,2	4,28	<b>27,9</b>	16	4,1	<b>24,7</b>	8,72	4,72	
trans- $\beta$ -ocimene	0	0	4,45	0	0	2,28	0	0	0,59	
cis- $\beta$ -ocimene	0	0	2,24	0	0	3,39	0	0	3,41	
<b>Total</b>	<b>94,27</b>	<b>87,26</b>	<b>93,06</b>	<b>94,14</b>	<b>87,44</b>	<b>91,22</b>	<b>94,47</b>	<b>88,56</b>	<b>92,76</b>	

Tabla A. 2. Datos cromatografías *Origanum vulgare subsp. virens*

(% ) Composición química aceite esencial										
Especie de cultivo PAM	Nombre del compuesto	Tratamiento								
		Soleado			Sombra-Soleado			Sombra completa		
		2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
<i>Mentha rotundifolia</i>	(E)-β-Caryophyllene	0,62	2,9	2,55	0,55	2,89	2,18	0,64	2,5	1,88
	1-Octen-3-yl-acetate	0,19	1,44	0,63	0,23	0,93	0,25	0,34	0,52	0,19
	Germacrene D	0,94	4,64	4,69	0,88	3,89	3,67	1,42	4,76	4,42
	Limonene	6,86	5,46	5,36	10,9	5,22	5,48	6,62	2,76	3,06
	Terpinen-4-ol	0,11	0,44	0,56	0,16	0,18	0,15	0,2	0,4	1,25
	Viridiflorol	0,09	0,41	1,12	0,1	0,47	0,16	0,28	0,98	0,43
	α-Pinene	1,04	1,34	1,02	1,17	1,37	0,88	0,85	1,04	0,84
	β-Pinene + 1-octen-3-ol	1,27	0	0	1,36	0	0	1,34	0	0
	Piperitenone	<b>54,2</b>	22,1	25,4	29	34,2	<b>57</b>	<b>42,9</b>	<b>39,8</b>	<b>61,9</b>
	Piperitenone-oxide	30,6	<b>42,6</b>	<b>39,9</b>	<b>50,9</b>	<b>35,6</b>	18,4	38,6	31	10,4
	β-pinene	0	1,73	1,45	0	1,74	1,02	0	1,26	0,86
	cis-beta-ocimene	0	0,86	1,65	0	0,82	0,53	0	0,6	0,66
	cis-sabinene hydrate	0	0,26	0,48	0	0,06	0,09	0	0,33	1,99
	<b>Total</b>	<b>95,88</b>	<b>83,91</b>	<b>84,31</b>	<b>95,2</b>	<b>87,26</b>	<b>89,72</b>	<b>93,19</b>	<b>85,63</b>	<b>85,9</b>

Tabla A. 3. Datos cromatografías *Mentha*

(% ) Composición química aceite esencial										
Especie de cultivo PAM	Nombre del compuesto	Tratamiento								
		Soleado			Sombra-Soleado			Sombra completa		
		2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
<i>Artemisia absinthium var. candleri</i>	(E)- $\beta$ -Caryophyllene	1,36	-	-	1,51	-	-	1,53	-	-
	1,8-Cineole	1,65	-	-	2,3	-	-	2,54	-	-
	Bicyclo[2,2,1]-hept-2-en-7-ol	21	-	-	22	-	-	13,5	-	-
	Camphor	0	-	-	2,43	-	-	0	-	-
	Chamazulene	2,01	-	-	2,51	-	-	2,13	-	-
	Germacrene D	1,08	-	-	0,82	-	-	1,42	-	-
	Linalool	4,54	-	-	4,28	-	-	3,43	-	-
	no identificado 2	1,01	-	-	1,12	-	-	1,05	-	-
	trans-Epoxyocimene	3,65	-	-	3,77	-	-	3,23	-	-
	Z-Chrysantenyl-acetate	14	-	-	2,38	-	-	19,4	-	-
	Z-Epoxyocimene	<b>40</b>	-	-	<b>47,6</b>	-	-	<b>42,7</b>	-	-
$\alpha$ -Pinene	1,65	-	-	1,69	-	-	1,23	-	-	
<b>Total</b>	<b>92,02</b>				<b>92,43</b>			<b>92,22</b>		

Tabla A.4. Datos cromatografías *Artemisia absinthium var. candleri*

## ANEJO B. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA LOS PARÁMETROS ANALIZADOS.

Estadístico	media	mediana	desv.	variacion
TAU [T] hora:10:30	0,712	0,747	0,212	0,045
TAU [T] hora:11:30	0,739	0,818	0,265	0,070
TAU [T] hora:12:30	0,670	0,782	0,306	0,094
TAU [T] hora:13:30	0,700	0,733	0,258	0,067
TAU [T] hora:13;dd	0,446	0,351	0,274	0,075
Leaf Area Index [LAI] hora:10:30	0,320	0,230	0,299	0,089
Leaf Area Index [LAI] hora:11:30	0,377	0,217	0,448	0,200
Leaf Area Index [LAI] hora:12:30	0,617	0,349	0,634	0,402
Leaf Area Index [LAI] hora:13:30	0,812	0,485	0,694	0,481
Leaf Area Index [LAI] hora:13;dd	1,237	1,315	0,741	0,549

Tabla B.1. Estadística descriptiva para el cultivo de borraja.

Estadístico	media	mediana	desv.	variacion
TAU [T] hora:10:30	0,560	0,461	0,327	0,107
TAU [T] hora:11:30	0,602	0,541	0,301	0,091
TAU [T] hora:12:30	0,603	0,658	0,337	0,113
TAU [T] hora:13:30	0,416	0,361	0,245	0,060
TAU [T] hora:13;dd	0,474	0,494	0,253	0,064
Leaf Area Index [LAI] hora:10:30	0,492	0,475	0,414	0,171
Leaf Area Index [LAI] hora:11:30	0,588	0,631	0,488	0,238
Leaf Area Index [LAI] hora:12:30	0,732	0,535	0,663	0,440
Leaf Area Index [LAI] hora:13:30	0,975	0,995	0,591	0,349
Leaf Area Index [LAI] hora:13;dd	0,921	0,745	0,554	0,307

Tabla B.2. Estadística descriptiva para el cultivo de puerro.

Estadístico	media	mediana	desv.	variacion
TAU [T] hora:10,30	0,791	0,838	0,116	0,034
TAU [T] hora 11,30	0,695	0,786	0,093	0,084
TAU [T] hora 12,30	0,621	0,640	0,070	0,099
TAU [T] hora 13,30	0,543	0,397	0,156	0,110
TAU [T] hora 13; dd	0,538	0,419	0,097	0,105
Leaf Area Index [LAI] hora:10,30	0,203	0,150	0,124	0,041
Leaf Area Index [LAI] hora 11,30	0,436	0,255	0,208	0,214
Leaf Area Index [LAI] hora 12,30	0,702	0,585	0,180	0,426
Leaf Area Index [LAI] hora 13,30	0,781	0,810	0,228	0,445
Leaf Area Index [LAI] hora 13; dd	0,944	1,050	0,223	0,467

Tabla B.3. Estadística descriptiva para el cultivo de acelga.

Estadístico	Media	Mediana	Desv.	Variación
hora:11	43,327	43,575	6,454	41,652
hora:12:30	45,193	44,575	5,932	35,191

Tabla B.4. Estadística descriptiva para el cultivo de borraja.

Estadístico	Media	Mediana	Desv.	Variación
hora:11	64,118	63,359	8,274	68,458
hora:12:30	66,214	67,775	8,753	76,613

Tabla B.5. Estadística descriptiva para el cultivo de puerro.

Estadístico	Media	Mediana	Desv.	Variación
hora:11	32,665	28,468	12,647	159,943
hora:12:30	26,665	26,291	4,977	24,766

Tabla B.6. Estadística descriptiva para el cultivo de acelga.

Estadístico	Fo	Fm	Fv	Fo/Fm	Fv/Fm	Phi(Po)
Media	773,821	3649,128	2875,308	0,217	0,783	0,783
Mediana	721	3835	3040	0,200	0,817	0,800
Desv.	134,340	483,567	516,358	0,055	0,055	0,055
Variación	18047,309	233836,746	266625,850	0,003	0,003	0,003

Tabla B.7. Estadística descriptiva para el cultivo de puerro.

Estadístico	Fo	Fm	Fv	Fo/Fm	Fv/Fm	Phi(Fo)
Media	576,815	2580,033	2003,233	0,241	0,759	0,759
Mediana	556	2696	2129,545	0,198	0,802	0,802
Desv.	130,233	647,192	651,229	0,089	0,089	0,090
Variación	16960,648	418857,689	424099,771	0,008	0,008	0,008

Tabla B.8. Estadística descriptiva para el cultivo de acelga.

Tratamiento	Media	Mediana	Desv.	Variación
Sombra	0,412	0,366	0,135	0,018
Sombra-sol	0,707	0,729	0,061	0,004
Sol	0,679	0,674	0,074	0,005

Tabla B.9. Estadística descriptiva para el cultivo de salvia.

Tratamiento	Media	Mediana	Desv.	Variación
Sombra	0,739904762	0,747	0,117122118	0,00572772
Sombra-sol	0,690333333	0,642	0,330945967	0,109525233
Sol	0,667904762	0,465	0,418551658	0,17518549

*Tabla B.10. Estadística descriptiva para el cultivo de menta.*

Tratamiento	Media	Mediana	Desv.	Variación
Sombra	0,499	0,618	0,232	0,054
Sombra-sol	0,629	0,843	0,373	0,139
Sol	0,645	0,823	0,315	0,099

*Tabla B.11. Estadística descriptiva para el cultivo de orégano.*

Tratamiento	Media	Mediana	Desv.	Variación
Sombra	0,528	0,598	0,271	0,074
Sombra-sol	0,909	0,908	0,260	0,068
Sol	0,651	0,694	0,095	0,009

*Tabla B.12. Estadística descriptiva para el cultivo de ajeno.*

## ANEJO C. MATERIAL FOTOGRÁFICO ADICIONAL.



*Figura C.1. Cultivo de acelga bajo estructura agrivoltaica con sombreado mediante malla.*



*Figura C.2. Detalle de la estructura de sombreado mediante malla instalada en la cubierta del sistema agrivoltaico.*



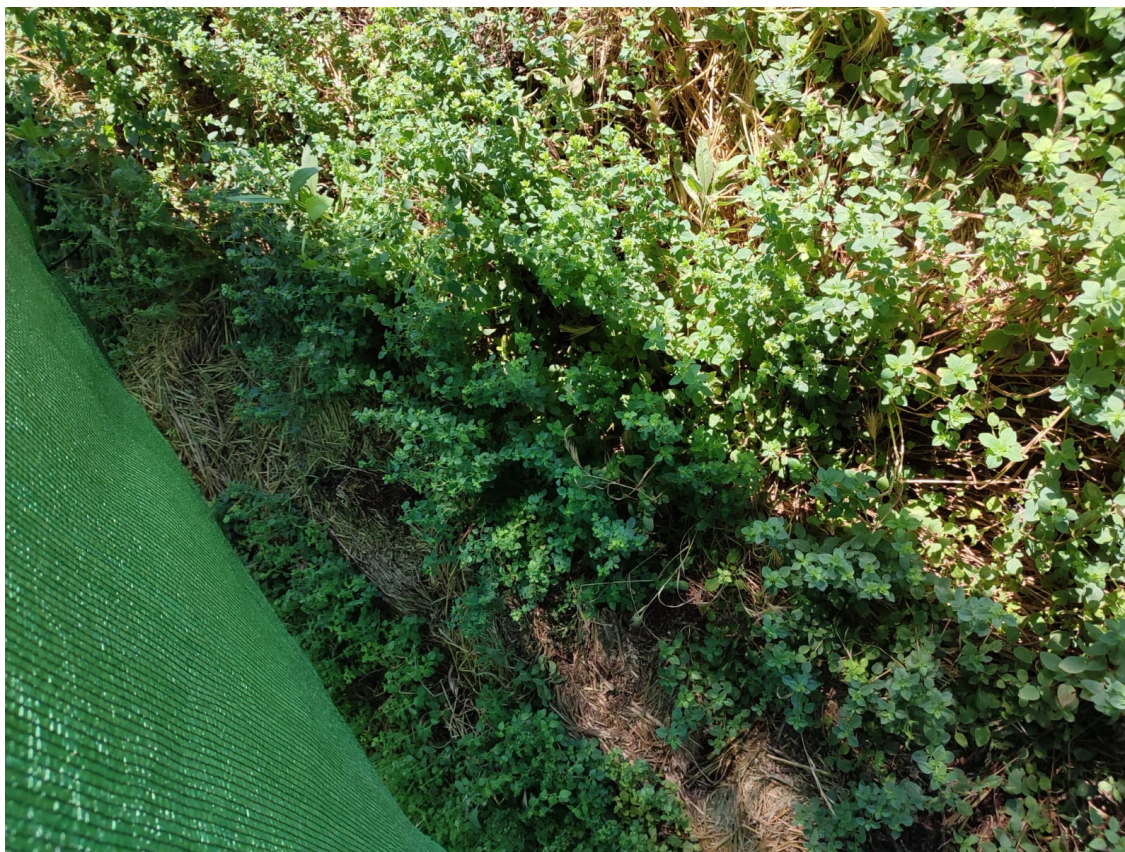
*Figura C.3. Medición de longitud de hoja de acelga e identificación para su posterior determinación de peso fresco y seco.*



*Figura C.4. Medición de radiación fotosintéticamente activa (PAR) bajo el dosel del cultivo del puerro mediante ceptómetro.*



*Figura C.5. Plantas de ajenjo cultivadas bajo tratamiento soleado en la parcela.*



*Figura C.6. Planta de menta bajo tratamiento sombreado en la parcela.*



*Figura C.7. Cultivo de ajeno bajo tratamiento soleado destacando la estructura de soporte.*



*Figura C.8. Planta de salvia bajo tratamiento de sol sombra en la parcela.*

## ANEJO D. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA Y SUELO.

Propiedades básicas		Resultados	Interpretaciones (*)
XK003	<b>XK Humedad 105 °C</b> Método : C5110007 Gravimetría Humedad	1.19 %	
XK007	<b>XK pH (extracto 1:2.5 H2O)</b> Método : C5110008 Potenciometría pH	8.5	Ligeramente alcalino
XK008	<b>XK Conduct. Eléctrica 25°C (extr. 1:5 H2O)</b> Método : C5110009 Conductimetría Conductividad eléctrica 25°C	0.18 dS/m	No limitante
XK006	<b>XK Carbono orgánico (C)</b> Método : C5110079 Titulación potenciométrica Carbon organico	1 % s.m.s.	
XK005	<b>XK Materia orgánica (W&amp;B)</b> Método : C5110079 Titulación potenciométrica Materia organica oxidable	1.73 % s.m.s.	Medio - bajo
XK009	<b>XK Carbonato cálcico equivalente</b> Método : Método interno Valoración potenciométrica (*) Carbonato cálcico equivalente	34.95 % s.m.s.	Muy calcareo
XK010	<b>XK Caliza activa</b> Método : Método interno Valoración potenciométrica (*) Caliza activa	8 % s.m.s.	Medio, clorosante
Nutrientes		Resultados	Interpretaciones (*)
XK123	<b>XK Nitrógeno total (N)</b> Método : C5110096 Conductividad termica Nitrógeno total	0.15 % s.m.s.	
XK012	<b>XK Nitrógeno nítrico (N-NO3)</b> Método : C5110272 Espectrofotometría UV-VIS Nitrógeno nítrico	2.0 mg/Kg s.m.s.	Normal
XK014	<b>XK Fósforo (P) (Olsen)</b> Método : C5110080 Espectrofotometría UV-VIS Fósforo sms	9.15 mg/Kg s.m.s.	Bajo
XK016	<b>XK Potasio (K) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Potasio sms	268 mg/Kg s.m.s.	Alto
XK017	<b>XK Calcio (Ca) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Calcio sms	6184 mg/Kg s.m.s.	Alto
XK018	<b>XK Magnesio (Mg) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Magnesio (Mg)	249 mg/Kg s.m.s.	Normal
XK019	<b>XK Sodio (Na) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Sodio (Na)	47 mg/Kg s.m.s.	Normal
<b>Código de muestra</b> 326-2024-00001091 <b>Fecha</b> 15/01/2024 <b>Página</b> 2/2			
<b>Número de informe analítico</b> AR-24-XK-003055-01 / 326-2024-00001091			
Relaciones de interes		Resultados	Interpretaciones (*)
XK157	<b>XK Relación Carbono Nitrógeno</b> Método : Método interno por cálculo Relación C/N	6.54	
XK151	<b>XK Relación Calcio/Magnesio</b> Método : Método interno por cálculo Calcio/Magnesio	24.8	Deficiencia de magnesio
XK152	<b>XK Relación Magnesio/Potasio</b> Método : Método interno por cálculo Relación Magnesio (Mg)/Potasio (K)	0.9	Deficiencia de magnesio
XK154	<b>XK Relación Calcio/Potasio</b> Método : Método interno por cálculo Relación Calcio (Ca)/Potasio (K)	23.1	Adecuado
Propiedades físicas		Resultados	Interpretaciones (*)
XK037	<b>XK Textura USDA Bouyoucos (3 fracciones)</b> Método : Método interno gravimetría (*) Arcilla < 0,002 mm	27.1 %	
	(*) Limo total (0.002-0.05 mm)	39.8 %	
	(*) Arena total (0.05 - 2 mm)	33.1 %	
	(*) Textura	Franco-arcillosa	
Micronutrientes		Resultados	Interpretaciones (*)
XK032	<b>XK Boro (B) (extracto H2O)</b> Método : Método Interno ICP-OES (*) Boro sms	1.58 mg/Kg s.m.s.	
XK033	<b>XK Microelementos extracción EDTA</b> Método : Método Interno ICP-OES (*) Hierro sms	198 mg/Kg s.m.s.	Normal
	(*) Cobre (Cu)	2.7 mg/Kg s.m.s.	Normal
	(*) Manganeso sms	179 mg/Kg s.m.s.	Normal
	(*) Zinc (Zn)	5 mg/Kg s.m.s.	Normal
	(*) Molibdeno (Mo)	<0.1 mg/Kg s.m.s.	

Figura D.1. Análisis físico-químico del suelo correspondiente a la parcela donde se cultivó acelga.

Propiedades básicas		Resultados	Interpretaciones (*)
<b>XK003</b>	<b>XK Humedad 105 °C</b> Método : C5110007 Gravimetría Humedad	<1 %	
<b>XK007</b>	<b>XK pH (extracto 1:2.5 H2O)</b> Método : C5110008 Potenciometría pH	8.5	Ligeramente alcalino
<b>XK008</b>	<b>XK Conduct. Eléctrica 25°C (extr. 1:5 H2O)</b> Método : C5110009 Conductimetría Conductividad eléctrica 25°C	0.20 dS/m	No limitante
<b>XK006</b>	<b>XK Carbono orgánico (C)</b> Método : C5110079 Titulación potenciométrica Carbon orgánico	1.18 % s.m.s.	
<b>XK005</b>	<b>XK Materia orgánica (W&amp;B)</b> Método : C5110079 Titulación potenciométrica Materia orgánica oxidable	2.04 % s.m.s.	Medio
<b>XK009</b>	<b>XK Carbonato cálcico equivalente</b> Método : Método interno Valoración potenciométrica (*) Carbonato cálcico equivalente	35.3 % s.m.s.	Muy calcareo
<b>XK010</b>	<b>XK Caliza activa</b> Método : Método interno Valoración potenciométrica (*) Caliza activa	7 % s.m.s.	Medio, clorosante
Nutrientes		Resultados	Interpretaciones (*)
<b>XK123</b>	<b>XK Nitrógeno total (N)</b> Método : C5110096 Conductividad termica Nitrógeno total	0.13 % s.m.s.	
<b>XK012</b>	<b>XK Nitrógeno nítrico (N-NO3)</b> Método : C5110272 Espectrofotometría UV-VIS Nitrógeno nítrico	<2 mg/Kg s.m.s.	Normal
<b>XK014</b>	<b>XK Fósforo (P) (Olsen)</b> Método : C5110080 Espectrofotometría UV-VIS Fósforo sms	12.7 mg/Kg s.m.s.	Normal
<b>XK016</b>	<b>XK Potasio (K) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Potasio sms	311 mg/Kg s.m.s.	Alto
<b>XK017</b>	<b>XK Calcio (Ca) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Calcio sms	6105 mg/Kg s.m.s.	Alto
<b>XK018</b>	<b>XK Magnesio (Mg) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Magnesio (Mg)	273 mg/Kg s.m.s.	Normal
<b>XK019</b>	<b>XK Sodio (Na) (extracto acetato amónico)</b> Método : C5110105 Espectrometría ICP-OES Sodio (Na)	52 mg/Kg s.m.s.	Normal

Código de muestra	326-2024-00001090	Fecha	15/01/2024	Página	2/2
Número de informe analítico	AR-24-XK-003054-01 / 326-2024-00001090				
Relaciones de interés		Resultados	Interpretaciones (*)		
<b>XK157</b>	<b>XK Relación Carbono Nitrógeno</b> Método : Método interno por cálculo Relación C/N	9.11			
<b>XK151</b>	<b>XK Relación Calcio/Magnesio</b> Método : Método interno por cálculo Calcio/Magnesio	22.3	Deficiencia de magnesio		
<b>XK152</b>	<b>XK Relación Magnesio/Potasio</b> Método : Método interno por cálculo Relación Magnesio (Mg)/Potasio (K)	0.9	Deficiencia de magnesio		
<b>XK154</b>	<b>XK Relación Calcio/Potasio</b> Método : Método interno por cálculo Relación Calcio (Ca)/Potasio (K)	19.6	Adecuado		
Propiedades físicas		Resultados	Interpretaciones (*)		
<b>XK037</b>	<b>XK Textura USDA Bouyoucos (3 fracciones)</b> Método : Método interno gravimetría (*) Arcilla < 0,002 mm	25.1 %			
	(*) Limo total (0.002-0.05 mm)	43.6 %			
	(*) Arena total (0.05 - 2 mm)	31.3 %			
	(*) Textura	Franca			
Micronutrientes		Resultados	Interpretaciones (*)		
<b>XK032</b>	<b>XK Boro (B) (extracto H2O)</b> Método : Método Interno ICP-OES (*) Boro sms	1.36 mg/Kg s.m.s.			
<b>XK033</b>	<b>XK Microelementos extracción EDTA</b> Método : Método Interno ICP-OES (*) Hierro sms	199 mg/Kg s.m.s.	Normal		
	(*) Cobre (Cu)	2.9 mg/Kg s.m.s.	Normal		
	(*) Manganeso sms	177 mg/Kg s.m.s.	Normal		
	(*) Zinc (Zn)	5 mg/Kg s.m.s.	Normal		
	(*) Molibdeno (Mo)	<0.1 mg/Kg s.m.s.			

Figura D.2. Análisis físico-químico del suelo correspondiente a la parcela donde se cultivó puerro.