

Análisis de los efectos del filtrado de la radiación ultravioleta mediante tubos protectores en el comportamiento de plantas de *Morella faya*

Analysis of the effects of ultraviolet radiation filtering through tree shelters on the behavior of *Morella faya* plants



Trabajo de Fin de Grado

MIGUEL COBOS CURBELO

Tutorizado por Jaime Puértolas Simón

Grado en Biología. Mayo 2024

Agradecimientos

Hace cuatro años ni siquiera estaba seguro de si este era el camino que quería seguir, pero hoy estoy profundamente orgulloso de la decisión que tomé. Llega el momento de poner el broche final a una gran experiencia que, por supuesto, no hubiera sido lo mismo sin quienes me han acompañado.

En primer lugar quiero agradecer a Águeda, Alicia y Vanesa, del área de Ecofisiología, su gran acogimiento durante estos meses de trabajo, y especial mención a mi tutor, Jaime, cuya paciencia y dedicación son motivo de que hoy este trabajo sea una realidad. Por supuesto, también quiero agradecer a Silvia y Elena, dos compañeras, pero sobre todo amigas, que han hecho que las mañanas, tardes y días de trabajo hayan sido mucho más amenas.

Gracias a la colaboración del Prof. Martínez Urrieta de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, por haberse ofrecido altruistamente a colaborar con parte de los análisis ópticos de este trabajo. A los trabajadores de la Tahonilla, Pablo, Santi y Anastasio, por sus continuas ganas de ayudar.

Y como no podía ser de otra manera, gracias en mayúsculas a mis biólogos favoritos, los upupas, que han conseguido que este gran viaje sólo tenga buenos recuerdos. No me imagino un pasado sin ellos, sin su apoyo incondicional para lo bueno y para lo malo.

Por último, agradecer a mi familia por haberme dado la oportunidad de poder llegar hasta aquí y haberme tendido una mano siempre que lo he necesitado. Pero, sobre todo, gracias a quienes me acompañaron al principio, pero nunca mejor dicho, la biología no ha permitido que pueda compartir este momento con ellos.

A todos, infinitas gracias.

Índice

RESUMEN	4
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	9
3. MATERIAL Y MÉTODOS	9
3.1. MATERIAL VEGETAL Y ÁREA DE EXPERIMENTACIÓN	9
3.2. TUBOS PROTECTORES	10
3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS	12
3.4. CRECIMIENTO Y MORFOLOGÍA	14
3.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN	15
3.6. CUANTIFICACIÓN DE PIGMENTOS ANTIOXIDANTES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE	15
3.7. APARATO FOTOSINTÉTICO	17
3.8. BIOMASA SECA	17
3.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	17
4. RESULTADOS	18
4.2. ALTURA	18
4.3. BIOMASA SECA AÉREA	19
4.4. PIGMENTOS ANTIOXIDANTES Y ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE	20
4.4. GROSOR	21
4.5. CLOROFILA	21
4.6. APARATO FOTOSINTÉTICO	22
4.7. EVAPOTRANSPIRACIÓN	23
5. DISCUSIÓN	23
5.1. ESTRUCTURA FOLIAR	23
5.2. CRECIMIENTO	24
5.3. ANTIOXIDANTES	25
5.4. APARATO FOTOSINTÉTICO	26
5.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN	27
5.6. CONSIDERACIONES GENERALES	27
6. CONCLUSIÓN	28
7. CONCLUSIONS	28
8. BIBLIOGRAFÍA	29

Resumen

La reforestación con tubos protectores se ha convertido en una estrategia clave para mitigar la pérdida de biodiversidad. La utilización de plásticos reciclados en su producción reduce significativamente la radiación ultravioleta (UV), por lo que estudiar su efecto es crucial. Este estudio evaluó la respuesta de *Morella faya* (faya) al filtrado de la radiación ultravioleta en tubos protectores, analizando 12 variables que abarcan aspectos como el crecimiento, la eficiencia fotosintética, el consumo de agua y la actividad antioxidante. Las plantas se sometieron a dos tipos de tubos protectores transparentes a la radiación visible: con y sin filtración UV, y cada uno estuvo condicionado por diferentes condiciones hídricas: riego y estrés hídrico por sequía. Los resultados indicaron que el filtrado de la radiación ultravioleta tiene un efecto neutral, aunque se observaron beneficios puntuales para la clorofila y actividad antioxidante. Además, se identificaron mecanismos de tolerancia al estrés hídrico, lo que confirma la gran capacidad de aclimatación de la faya. Estos hallazgos respaldan provisionalmente el uso de plásticos reciclados para la fabricación de tubos protectores. Sin embargo, se requiere investigación adicional en un mayor número de especies para confirmar estos resultados y comprender en su totalidad el impacto del filtrado de la radiación UV en la reforestación.

Palabras clave: Tubos protectores, reforestación, radiación ultravioleta.

Abstract

Reforestation with tree shelters has become a key strategy to mitigate biodiversity loss. The use of recycled plastics in their production significantly reduces ultraviolet (UV) radiation, making it crucial to study its effect. This investigation evaluated the response of *Morella faya* (faya) to UV radiation filtering in tree shelters, analysing 12 variables such as growth, photosynthetic efficiency, water consumption and antioxidant activity. Plants were subjected to two types of productive tubes transparent to visible radiation: with and without UV filtering, each one conditioned by different water conditions: watering and water stress due to drought. Results indicated that UV radiation filtering has a neutral effect, although occasional benefits were observed for chlorophyll and antioxidants activity. Additionally, mechanisms of tolerance to water stress were identified, confirming faya's remarkable acclimatization capacity. These findings provisionally support the use of recycled plastics in tree shelters. However, further

research in a larger number of species is needed to confirm these results and fully understand the impact of UV radiation filtering on reforestation.

Key words: Tree shelters, reforestation, ultraviolet radiation.

1. Introducción

La transformación del actual modelo de desarrollo humano es crucial para evitar una próxima extinción masiva, la amenaza más grave e inmediata a la que se enfrenta la sociedad (Feigin et al., 2023). La biodiversidad, la base de la vida en la tierra, se encuentra en grave peligro debido a los incesantes ritmos de degeneración (Gonzalez et al., 2023). La modificación física del territorio y las alteraciones en el uso de la tierra, el cambio climático, la explotación de los recursos naturales, la contaminación, la sobreexplotación de especies y la alta presión demográfica, son algunos de los factores que contribuyen a esta causa (Tan et al., 2023). Precisamente, el alto crecimiento poblacional está contribuyendo de manera sustancial a la deforestación y destrucción de hábitats (Martin, 2023).

Paliar una crisis sin precedentes como la actual puede enfocarse desde diferentes perspectivas. Una de las principales estrategias para este gran desafío consiste en acentuar los esfuerzos en la restauración de los ecosistemas mundiales. Así pues, la sinergia entre la restauración forestal y la disminución de la deforestación se perfila como una estrategia eficaz de mitigación del cambio climático y calentamiento global, así como de la conservación del patrimonio natural (Abbas et al., 2023).

Las superficies forestales tienen un gran potencial para apoyar vías de desarrollo sostenible. Contribuyen a la protección de los recursos hídricos y del suelo, contienen tres cuartas partes de la biodiversidad terrestre mundial y juegan un importante papel en la mitigación de la transformación climática (FAO, 2021), favoreciendo al correcto funcionamiento del ciclo del carbono (Verkerk et al., 2022). Se ha estimado que es necesario aumentar en 1000 millones las hectáreas de bosque para limitar el calentamiento global a 1,5°C en 2050 (Chau et al., 2021). Con el objetivo de desacelerar la dinámica planetaria actual, se han puesto en marcha numerosos programas de reforestación y restauración de ecosistemas forestales a lo largo de la geografía mundial. Ejemplos notables incluyen la Declaración de los Líderes de Glasgow sobre los Bosques y el Uso de la Tierra, acordada en la COP 26 (United Nations, 2021).

En las iniciativas de reforestación es crucial tener en cuenta la potencialidad del territorio y a su vez, utilizar aquellas especies que aporten una mayor cantidad de servicios ecosistémicos. Se debe poner especial atención a aquellos territorios y áreas con un importante valor ambiental, y que contribuyen notoriamente a la conservación de la biodiversidad. Claros ejemplos lo son regiones como el archipiélago canario (entre otras), que contienen el 50 % de los endemismos vegetales de España (Fundación Global Nature, 2010), una riqueza natural que se traduce también en una destacable reducción de gases de efecto invernadero.

Especies como *Morella faya* (Aiton) Wilbur (faya) y sus asociaciones vegetales, se sitúan como las masas forestales con más implicación en la neutralización de dióxido de carbono en toneladas por año del archipiélago (Gobierno de Canarias, 2023). La faya también ha sido seleccionada como especie prioritaria para la reforestación tras los incendios forestales. Debido a su carácter higrófilo, es capaz de proteger tanto a los propios entornos forestales como a los urbanos frente a los incendios (Fundación Global Nature, 2010; Gobierno de Canarias, 2023). Además, *Morella faya* (faya) se incluye en múltiples planes de reforestación y restauración ecológica de reciente aprobación (Fundación Global Nature, 2010; Gobierno de Canarias, 2023; Cabildo de Tenerife, 2022), siendo por tanto un objetivo para la investigación.

No obstante, toda estrategia de gestión forestal requiere de avances significativos en las técnicas empleadas, dada la complejidad del manejo y estudio de los recursos forestales (Löf et al., 2019). En este contexto, el empleo de tubos protectores de plástico emerge como una estrategia clave en la reforestación y regeneración de los entornos silvícolas. Estos dispositivos se utilizan de manera habitual para la plantación de plántulas, ofreciendo un refugio que mejora tanto el crecimiento como supervivencia de las plantas (Abe, 2022). La efectividad de los tubos protectores se atribuye a su papel en la mitigación de estreses abióticos y bióticos. Estas estructuras, más allá de proteger contra el ramoneo de herbívoros, crean un microclima local beneficioso a modo de invernadero. Los protectores eliminan los daños físicos causados por el viento, generan un ambiente capaz de eliminar los excesos de radiación, amortiguan las temperaturas extremas y aportan humedad (Liović et al., 2019; Yagi, 2022). En definitiva, el uso de tubos protectores aumenta el crecimiento y supervivencia de las plantas. Su uso se ha extendido por diferentes regiones geográficas y se ha aplicado sobre una gran variedad de especies, contrastándose sus beneficios en todos los casos. No obstante, la idoneidad de los

protectores está supeditada a su diseño y condiciones de aplicación. El estudio de las características de los protectores y que influyen sobre las plantas, tales como el color, grosor o transmitancia, es crucial para poder seguir mejorando su uso (Oliet & Jacobs, 2007).

Lo cierto es que la adopción del uso de tubos protectores como una estrategia de reforestación y restauración no está exenta de desafíos, especialmente en lo concerniente a las implicaciones ambientales de la producción de plástico utilizada para su fabricación. Este enfoque práctico podría implicar la generación de una cantidad sustancial de plástico para los tubos protectores, lo cual puede plantear riesgos ambientales significativos y, paradójicamente, ser contraproducente para los objetivos de sostenibilidad. Sin embargo, comparaciones entre el rendimiento ecológico de plantas asistidas por protectores con casos en el que no se emplea la protección, refuerzan la idoneidad del empleo de tubos plásticos como estrategia clave. Existen diferencias significativas entre las tasas de supervivencia de plantas protegidas y sin protección, con valores del 67 y 2 % respectivamente. Además, este dato adquiere vital relevancia al considerarse un impacto neto de emisiones de carbono asociadas entre la plantación de árboles con y sin refugios a partir de 25 años de crecimiento (Chau et al., 2021).

En cualquier caso, recientemente se han llevado a cabo estudios dirigidos a evaluar la viabilidad de emplear plásticos reciclados en la fabricación de tubos protectores (Martínez Urreaga et al., 2020). Entre los distintos destinos del plástico, el reciclaje emerge como la alternativa más prometedora desde una perspectiva ambiental, ya que se traduce en un menor consumo de materias primas y energía asociada a la fabricación de polímeros vírgenes, a la vez que reduce el volumen de residuos (Gu et al., 2017). Sin embargo, se ha demostrado que la utilización de este tipo de plásticos en la fabricación de protectores disminuye significativamente la transmisividad de la luz, considerándola como un factor determinante para explicar el aumento de la supervivencia ligada al uso de tubos protectores (Oliet et al., 2021). La mayoría de los estudios ópticos en protectores se han enfocado en la transmisividad del espectro de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Puértolas et al., 2010). No obstante, el uso de plásticos reciclados en la fabricación de tubos de protección ha documentado disminuciones significativas en otras longitudes de onda de la distribución espectral. Concretamente, la radiación ultravioleta (UV) ha presentado disminuciones significativas en la transmisividad cuando se utilizan

plásticos reciclados, pues se dan atenuaciones muy elevadas, tanto para la radiación ultravioleta A (UVA) como ultravioleta B (UVB) (Martínez Urreaga et al., 2020).

Una parte de la energía solar que llega a la superficie terrestre lo hace en el espectro ultravioleta, concretamente en forma de UVA (315-400 nm) y UVB (280-315 nm), siendo la primera la que llega en mayor proporción, pero también la menos dañina (Aphalo et al. 2012). Independientemente del hábitat y forma de vida de las plantas, la radiación ultravioleta es capaz de generar múltiples cambios a distintos niveles: morfológicos, bioquímicos y anatómicos. Pueden sucederse fluctuaciones al alza o a la baja en el área y grosor de las hojas (Robson et al., 2015) en la altura y grosor del tallo, en el contenido de biomasa seca (Chen et al., 2019), así como en la síntesis y acumulación de antioxidantes (Xie et al., 2020).

Otros parámetros susceptibles de presentar oscilaciones frente a la radiación ultravioleta son los relativos al proceso fotosintético, como la eficiencia del fotosistema II (PSII) y los niveles de clorofila. El correcto funcionamiento del PSII, cuantificable a través de la fluorescencia de la clorofila a, se ha posicionado como uno de los valores medibles más relevantes para determinar el estado de vitalidad de la planta frente a la exposición de agentes estresantes como la radiación UV (Delgadillo Rodríguez et al., 2017).

Además, también existe una tolerancia cruzada entre la respuesta a la sequía y la irradiancia UV. Se sospecha que, a nivel foliar, la respuesta a la radiación UV guarda relación con la tolerancia al estrés hídrico. No obstante, se disponen de pocos datos sobre la respuesta de las plantas a los rayos UVA y UVB bajo condiciones de sequía (Verdaguer et al., 2012). En este sentido, es importante profundizar en la relación entre el agua y la radiación UV para determinar si alguno de los factores ejerce influencia sobre el otro.

A pesar de que existen disminuciones significativas del espectro UV cuando se utilizan plásticos reciclados para la elaboración de los protectores, estudiar su efecto en la vitalidad de las plantas es crucial. Se puede conseguir así dar alas a una importante estrategia de reforestación, ligada a su vez a un remedio ambiental como lo es el reciclado del plástico. Sin duda, un claro ejemplo de economía circular que cumple con los actuales objetivos y desafíos de futuro (Foschi & Bonoli, 2019; Leal Filho et al., 2019). Hasta ahora se ha estudiado el efecto tanto de los tubos protectores como de la radiación ultravioleta en las plantas, pero cada uno de ellos por separado. Algunos ejemplos son los

trabajos de Oliet et al., (2021) y Rai et al. (2021) respectivamente. Sin embargo, no existe bibliografía alguna que determine la sinergia de ambos factores de manera conjunta.

2. Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es determinar el efecto de la transmisividad de la radiación ultravioleta en tubos protectores de plástico sobre la fisiología, anatomía y morfología, en plantas de *Morella faya* (faya). Para ello se establecieron 4 objetivos específicos:

- Determinar la influencia de la radiación UV a través de tubos protectores en el crecimiento de la planta.
- Analizar la variabilidad de los niveles de pigmentos antioxidantes y actividad antioxidante entre plantas expuestas y protegidas frente a la radiación UV.
- Estudiar el efecto de la radiación ultravioleta sobre la eficiencia fotoquímica a través de los parámetros Fv/Fm y concentración de clorofila.
- Examinar la interacción entre el estrés hídrico por sequía y la radiación UV en los objetivos anteriores.

3. Material y métodos

3.1. Material vegetal y área de experimentación

Como área de experimentación se utilizaron las instalaciones del complejo ambiental La Tahonilla, dependiente del Cabildo de Tenerife, y donde se localiza el Vivero Insular de Flora Autóctona destinado a la producción de material vegetal para la restauración ecológica. El trabajo de campo se desarrolló durante algo más de dos meses, dando comienzo el 09/02/24 y finalizando el 19/04/24. Dentro del complejo ambiental, se utilizaron dos canteros donde se distribuyeron 80 juveniles de faya. Se hizo una selección previa de las mismas para asegurar la homogeneidad del tamaño, estableciéndose una altura objetivo de 30 cm. Finalmente, la altura media de las plantas del estudio fue de 33,9 ± 5,9 cm (media ± desviación estándar). Tras el cribado inicial, se procedió al trasplante de cada uno de los individuos a macetas con una capacidad de 5L. Como sustrato se utilizó una mezcla de 500 L de turba, 200 L de perlita, 100 L de vermiculita y 50 L de fibra de coco. Además, para el total de ese volumen (850 L), se añadieron 2 L de fertilizante de liberación lenta (Osmocote Pro-5-6M, ICL, Israel). Una mezcla de NPK 19-9-10 y micronutrientes traza.

3.2. Tubos protectores

Los tubos protectores utilizados fueron elaborados manualmente a partir de plásticos con características de interés. Por un lado, se elaboraron tubos protectores a partir de plástico con filtro de radiación ultravioleta (226 U.V, Lee Filters, Reino Unido). Por otro lado, se hicieron tubos plásticos sin tratamiento de filtración UV de acetato comercial. Este último tipo de protector fue el utilizado para el tratamiento “UV+”, equivalente al tratamiento control, mientras que el primero se utilizó para el tratamiento “UV-”, equivalente a la condición filtro ultravioleta. Una mitad del tamaño muestral se sometió a un tipo de protector, y la otra mitad a otro. Por lo tanto, se elaboraron un total de 40 protectores de cada tipo.

Para garantizar una misma transmisividad en el espectro visible y que solo hubiera diferencias en la región UV entre los plásticos utilizados, se llevó a cabo una selección previa entre varios materiales. Para ello se efectuó una caracterización comparativa de la transmisividad teórica medida con radiación incidente perpendicular, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis con una velocidad de barrido de $200 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ (Shimadzu 2401 PC, BaneBio, EE. UU). Los resultados avalaron el uso de los plásticos escogidos (Fig. 1). Ambos muestran una clara igualdad de transmisividad del espectro fotosintético activo (PAR; 400-700 nm), mientras que presentan diferencias para la radiación UV. En UV- (con filtro ultravioleta) existe una clara atenuación para UVB y UVA respecto al plástico utilizado para UV+ (sin filtro ultravioleta). En UVB las diferencias son menores, pero también es menor la cantidad incidente de esta radiación sobre la superficie terrestre. Dado que el objetivo general de este estudio versa sobre la radiación ultravioleta, también se examinó la variación de la filtración de la radiación UVA y UVB en cada uno de los protectores a lo largo de un día solar (Fig. 2). Al igual que en la Figura 1, existen diferencias de transmisividad que aseguran la correcta compatibilidad de los plásticos utilizados para realizar la experimentación. Aunque UV+ filtra ligeramente la radiación UV respecto al aire, las diferencias con UV- son marcadas.

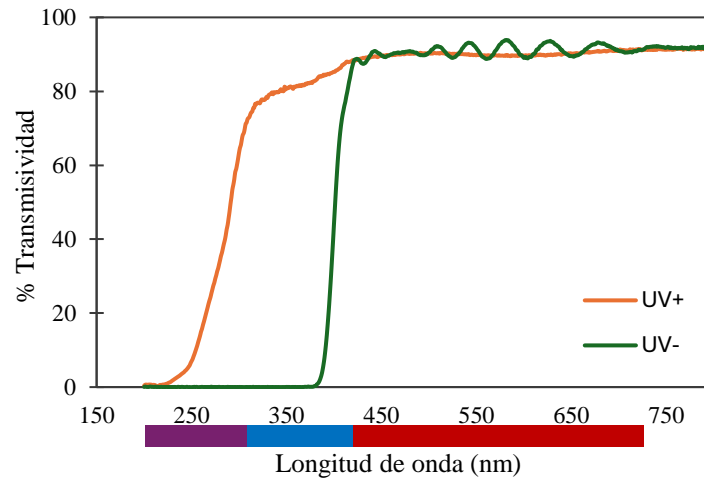


Figura 1. Porcentaje de transmisividad de los plásticos usados para la fabricación de tubos protectores medidos en el espectro electromagnético. Filtro UV: UV-, Sin filtro UV: UV+. La franja roja indica la región PAR: 400-700nm; la azul la UVA: 400-315nm; la violeta la UVB: 315-280nm.

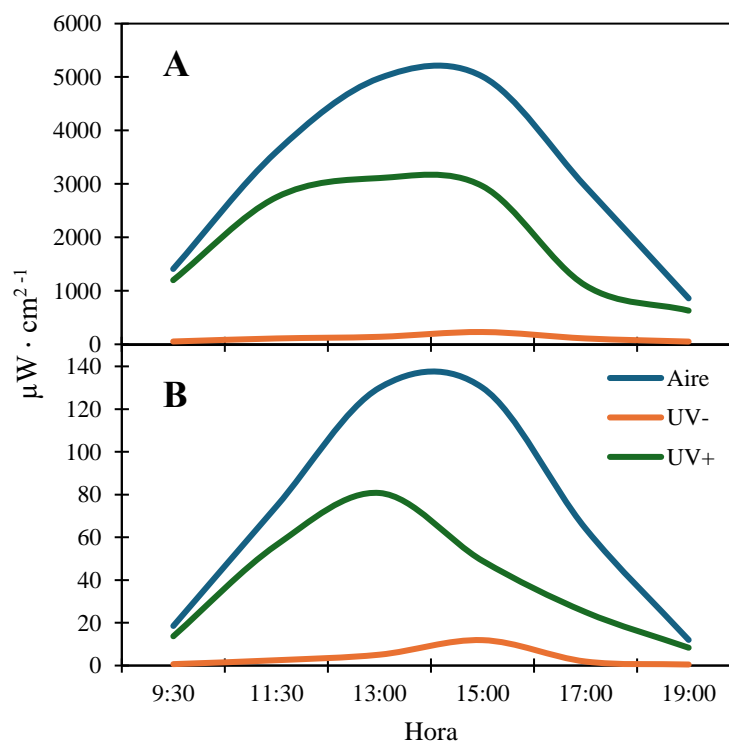


Figura 2: Variación de la transmisividad de la radiación UVA (A) y UVB (B) a lo largo de un día solar dentro de cada uno de los dos protectores (filtro UV: UV-; sin filtro UV: UV+) y al exterior (Aire). Valores (n=1) medidos cada dos horas durante el periodo diurno.

El diseño de los tubos de protección fue idéntico para ambos tipos de materiales y tratamientos. Se determinó un diámetro de 14 cm y una altura de 60 cm asegurando que las hojas más altas al inicio del ensayo estuvieran al menos 20 cm por debajo del borde

superior del protector. Estas medidas coinciden con las dimensiones estándar comúnmente empleadas en los tubos de protección (Rojas-Arévalo et al., 2022). Además, se practicaron tres orificios de ventilación por cada lado de los protectores, dispuestos de manera equidistante entre sí y entre los extremos superior e inferior del tubo, con un diámetro de 3 cm cada uno. La ventilación de los tubos protectores es esencial para asegurar buenos niveles de CO₂, una correcta transpiración de la planta, así como para evitar que el aumento de la temperatura en el interior del tubo sea perjudicial (Bergez y Dupraz, 2000).

Los plásticos eran laminares, por lo que para la elaboración de la estructura de protector se cortaron fragmentos de 60x40 cm, alcanzándose así las medidas deseadas. Posteriormente se creó la estructura tipo tubo uniendo los extremos laterales de las láminas con cinta americana. La parte encintada se dispuso en orientación norte para evitar que generara sombra sobre la planta. En el caso del tratamiento control, las láminas tenían unas dimensiones de 30x40 cm, por lo que también se tuvo que realizar una pequeña unión entre ambas.

Para la colocación de los protectores en las macetas se hizo uso de tutores de bambú. Se colocaron un mínimo de 2 por planta. En algunos casos, cuando la corpulencia de la planta era menor, se hizo uso de un tercer tutor para mayor robustez.

3.3. Diseño experimental y tratamientos

Dentro de los tratamientos UV- y UV+ descritos anteriormente, se diferenciaron condiciones de riego y estrés hídrico por sequía. Se cumple así con el objetivo referido al estudio de la interacción entre la radiación UV y la sequía. Por lo tanto, existen un total de 4 tratamientos diferentes en el estudio: UV+ riego, UV- riego, UV+ estrés hídrico por sequía y UV- con estrés hídrico por sequía. De cada uno había un total de 20 ejemplares. La distribución de los diferentes tratamientos fue simétrica para cada uno de los canteros utilizados. En cada uno de ellos se colocó la mitad de los individuos, es decir 40. A su vez, en cada cantero se dispuso la mitad de cada uno de los 4 tratamientos o lo que es lo mismo, 10 ejemplares. La disposición de las plantas fue aleatoria y al tresbolillo, evitando la generación de sombra entre plantas. Además, se hizo una rotación semanal de las macetas para evitar el efecto sitio.

Antes de dar comienzo a los distintos tratamientos se partió de un riego homogeneizado en todos los individuos. Los ejemplares sometidos a riego se regaron 3 veces por semana desde el comienzo y hasta el final de la experimentación. En el caso de los individuos de sequía, se determinaron diferentes valores límites de humedad a partir de los cuales se debía realizar el riego, evitando llegar a una situación de estrés demasiado severa. Las mediciones de humedad del suelo se realizaron con un sensor de humedad Theta Probe 4 conectado a un medidor Moisture Meter HH2 (Delta-T, Reino Unido). El sensor incorpora 4 varillas de acero que se insertan en el sustrato y que contienen electrodos. Por defecto, el software del medidor incorpora valores de referencia de la constante dieléctrica de suelos secos orgánicos con mezclas de turba, fibra de coco y perlita, lo que coincide con el sustrato utilizado en la experimentación. Dado que el agua tiene una elevada constante dieléctrica, cuando la tierra está mojada aumenta la constante dieléctrica del medio en respuesta al voltaje aplicado en mV por parte del medidor hacia el sensor. A través de tablas de linealización y parámetros específicos del suelo, el medidor es capaz de transformar las diferencias de constante dieléctrica detectadas en el sustrato en relación con su condición seca en contenido de humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Para el cálculo de los valores límites de humedad indicadores de la necesidad de riego se hicieron observaciones del grado de marchitez de las hojas durante el secado del sustrato. Durante las primeras semanas se fijó un valor límite de $0,17 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Teniendo en cuenta la capacidad de aclimatación de las plantas así como de reducción de la vulnerabilidad al estrés hídrico a medida que la planta crece, los valores límites se fueron rebajando. En este sentido, el valor límite que en un principio suponía una situación de estrés ($0,17 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), deja de serlo más adelante. Por eso, en la semana tres y cuatro, el valor límite de referencia fue de $0,13 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. A partir de la semana 4 y hasta el final de la experimentación, ese valor se fijó aún más a la baja hasta situarse en un $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Tras la colocación de los protectores, que se hizo después del trasplante inicial, se dejó un periodo de aclimatación de 10 días antes del comienzo de las mediciones. Todas las variables estudiadas fueron medidas en el mediodía solar sobre hojas adultas de la parte apical (a excepción de la humedad que se mide en la tierra). Además, para determinar el posible efecto de las condiciones ambientales sobre las variables analizadas, se tuvieron en cuenta los registros de temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) y radiación ($\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$) (Fig. 3)

asociados a una estación meteorológica junto al área de experimentación (San Cristóbal de La Laguna; 28.47791N, 16.31943O; 559 msnm).

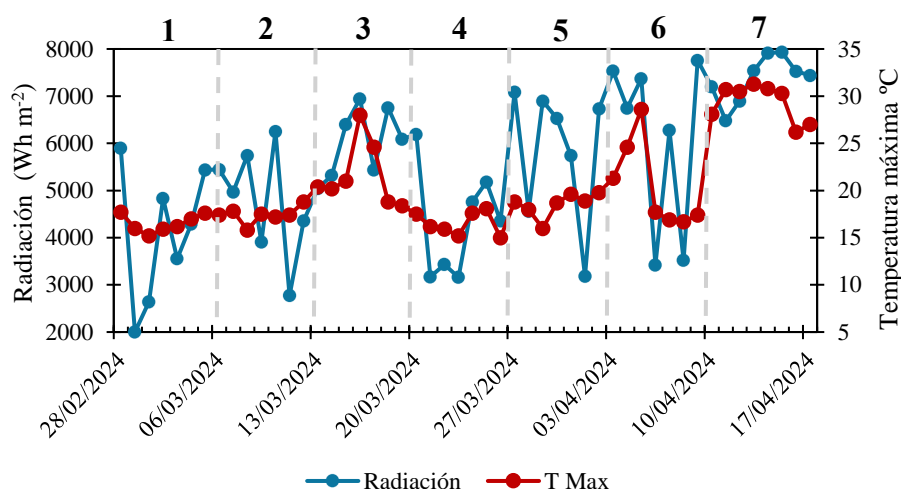


Figura 3: Registros de temperatura y radiación durante el periodo de experimentación. Las fechas indican los días en los que se realizaron las mediciones. La humedad también se tomó dos días más por semana a parte de los señalados. Los espacios (1-7) separados por líneas discontinuas indican las semanas de medición.

3.4. Crecimiento y morfología

Dentro de las medidas de morfología se calculó el grosor y área foliar específica (AFE) quincenalmente en 5 ejemplares de cada tratamiento. Para la toma de grosores se utilizó un micrómetro digital (Inch/Metric, Mitutoyo, Japón), cuyas mediciones se hicieron *in situ* en campo para evitar la deshidratación de la hoja. Posteriormente se tomaron fotos a escala de cada una de ellas y, por último, se almacenaron en estufa a 60°C un mínimo de 48 horas. De esta manera se puede calcular el área foliar específica ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) que responde a la siguiente ecuación:

$$(1) \text{Área foliar específica (AFE)} = \frac{\text{Área foliar (AF)} (\text{cm}^2)}{\text{Peso seco (g)}}$$

El peso seco (PS) se obtiene después de la deshidratación de la hoja. Para el cálculo del área foliar (AF) se hizo uso del programa de procesamiento y análisis digital de imágenes en Java, Image J.

Las medidas anatómicas que se llevaron a cabo fueron las relativas a la altura y diámetro del tallo. Se registraron en todos los individuos al inicio, antes de la colocación de los protectores, y al final, en el momento de la finalización del experimento. Para la altura se utilizó una cinta métrica. Se midió desde la zona de contacto entre el tallo y la tierra y

hasta la yema apical más superior sin tener en cuenta las hojas. Para la toma de los diámetros del tallo se utilizó un calibrador digital (Z22855, POWERFIX Profi, Alemania), midiendo siempre a una altura de 1 cm respecto a la base de la planta. Dado que los tallos no siempre describen una circunferencia perfecta en su perímetro, se hicieron dos mediciones por cada planta, una perpendicular a la otra, y posteriormente se calculó el promedio de ambas.

3.5. Evapotranspiración

Se realizaron mediciones de humedad del sustrato antes y después del riego para 5 individuos de cada uno de los tratamientos (en los de estrés hídrico por sequía se realizaba en todos los individuos para determinar si se debía proceder al riego de la planta) haciendo uso del sensor y medidor de humedad anteriormente descrito. La toma de datos se hizo 3 veces por semana. Para poder determinar la tasa de evapotranspiración se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Se calculó el consumo de agua volumétrica por día (ΔH ; $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), equivalente a la diferencia entre el valor de humedad después del riego, en el momento t (H_t) y antes del riego, en el momento $t+x$ (H_{t+x}), donde x es el número de días que transcurren entre una medición de humedad y la siguiente; resultando la siguiente ecuación

$$(2) \text{ Consumo volumétrico de agua por día } (\Delta H) = \frac{(H_t) - (H_{t+x})}{x}$$

2. Posteriormente se determinó la evapotranspiración (ET ; cm^3) por maceta. Teniendo en cuenta un volumen total de 5000 cm^3 , el cálculo es el siguiente:

$$(3) \text{ Evapotranspiración } (ET) = 5000 \cdot (\Delta H)$$

3.6. Cuantificación de pigmentos antioxidantes y actividad antioxidante

Se determinó el valor de flavonoides y antocianinas una vez por semana en 10 individuos de cada tratamiento. Para ello se hizo uso de un sensor foliar (Dualex, METOS, Austria). Es importante realizar las mediciones en la zona media de la hoja, pues aquí los valores son más representativos y menos variables. Este equipo no invasivo emite diferentes longitudes de onda en base al espectro de absorción de cada compuesto: ultravioleta (UV, 200-400 nm) para los flavonoides y verde (400-600 nm) para las antocianinas. Una fracción de la luz emitida se refleja en forma de fluorescencia en el infrarrojo cercano

(780nm), lo que permite determinar así la cantidad de flavonoides y antocianinas en unidades de absorbancia relativa.

Aunque el Dualex nos permite conocer flavonoides y antocianinas, existen otros muchos antioxidantes cuyas concentraciones son susceptibles de presentar variaciones frente a la radiación ultravioleta (Liu et al., 2012). Así pues, también se evaluó la actividad antioxidante de las hojas. Esta medición se realizó una vez cada dos semanas en 5 individuos de cada uno de los tratamientos. Para evitar la degradación de las muestras, fueron sometidas a congelación inmediata haciendo uso de un tanque de nitrógeno líquido de la serie Dry Shipper (Voyageur, Air liquide Healthcare, Francia). Este tipo de análisis, a diferencia del resto de las variables del estudio, necesita procesarse en un laboratorio. Concretamente se utilizó el método de α, α -difeníl- β -picrilhidrazilo (DPPH) (Blois, 1958). El ensayo se basa en la medición de la capacidad de barrido de antioxidantes hacia el DPPH. El α, α -difeníl- β -picrilhidrazilo es un radical libre oxidante estable (DPPH \cdot) (Fig. 4) cuando está disuelto en metanol, y que se caracteriza por tener un color violeta intenso con un pico máximo de absorción a 515 nm. Compuestos antioxidantes (A-H en Fig. 4) son capaces de reaccionar con este radical DPPH \cdot , cediéndole un electrón de un átomo de hidrógeno y reduciéndolo a 2,2-difenil-1-hidrazina (DPPH-H). Este último se caracteriza por tener un color amarillo pálido, una característica que hace al DPPH ideal para cuantificar la capacidad antioxidante de extractos vegetales mediante espectrofotometría. Concretamente, la actividad antioxidante se calcula de manera indirecta en forma de equivalentes de Trolox, un potente antioxidante utilizado en el protocolo de DPPH. Con concentraciones conocidas de Trolox se elabora una recta patrón, y en esta, a través de la cuantificación por espectrofotometría, se calcula el equivalente de la actividad antioxidante de las muestras de interés. Para ello hace falta hacer uso de la siguiente ecuación:

(4) *Actividad antioxidante (equivalentes de Trolox)*

$$= \frac{[eq. Trolox en la dilución] \frac{mg}{ml} \cdot ml \text{ de metanol usados en la extracción}}{mg \text{ de peso liofilizado}}$$

expresándose la actividad antioxidante como equivalentes de Trolox normalizados al peso liofilizado inicial de muestra ($mg \cdot ml^{-1} \cdot mg^{-1}$).

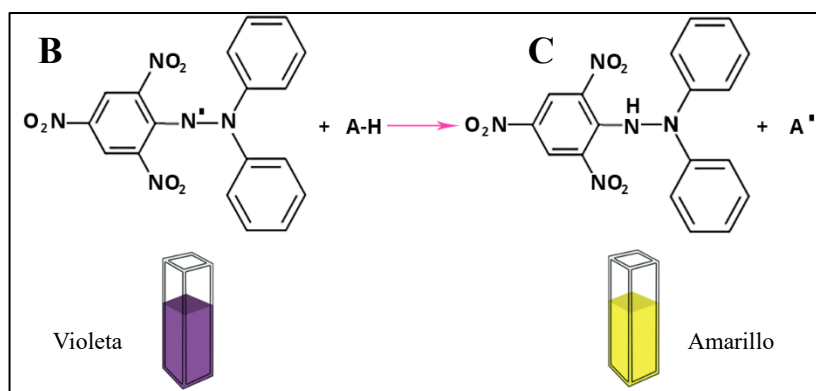


Figura 4: Transformación del DPPH de su forma oxidada (B) a reducida (C) tras reaccionar con los antioxidantes (A-H). El viraje de color de violeta a amarillo indica la reducción de la molécula.

Fuente: Biociencias + Tecnología, 2021.

3.7. Aparato fotosintético

Para poder determinar la eficiencia fotoquímica (F_v/F_m) del PSII se midió la fluorescencia de la clorofila a una vez por semana en 10 ejemplares de cada tratamiento. Se utilizó un fluorímetro modulado de pulso continuo (Handy-PEA, Hansatech Instruments, Reino Unido). Este aparato es capaz de medir la fluorescencia de la clorofila a mediante la emisión de pulsos de luz saturante de $3000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en hojas sometidas a oscuridad durante al menos 30 minutos, para lo que se hizo uso de clips foliares. Además, también se midió el contenido de clorofila en un mismo tamaño muestral y frecuencia a través del empleo del Dualex. A diferencia de antocianinas y flavonoides, en este caso se emiten longitudes de onda en el rojo lejano (730nm), permitiendo el cálculo de la concentración de clorofila en $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$.

3.8. Biomasa seca

Se midió la biomasa seca tanto radicular como aérea de cada una de las plantas a la finalización del experimento. Las plantas fueron recolectadas y limpiadas minuciosamente para eliminar cualquier tipo de resto de tierra que pudiera interferir en el peso real. Se dejaron secando 24h en invernadero, se desecaron en estufa un mínimo de 48h a 70°C y finalmente, se pesaron, separando la parte aérea de la radicular.

3.9. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para evaluar el efecto de los factores filtro UV (+/-) y del riego (riego/estrés) sobre las diferentes variables para cada semana. La distribución normal de los residuos se comprobó mediante las pruebas

Shapiro-Wilk ($n < 50$) y Kolmogórov-Smirnov ($n > 50$). La homocedasticidad se corroboró con el estadístico de Levene. Para la ejecución del análisis se hizo uso del software de análisis estadístico IBM SPSS Statistics for Windows. Version 29. El intervalo de confianza empleado fue del 95%, por lo que p valores menores a 0,05 indican significación en los datos.

4. Resultados

Del total de los 12 parámetros analizados, hubo 4 en los que no se detectaron diferencias significativas: área foliar específica, incremento del diámetro, biomasa seca radicular y flavonoides (Tabla 1).

Tabla 1

Media \pm desviación estándar de las variables que no presentaron efectos significativos en la prueba ANOVA para ninguna de las semanas ni combinación de tratamientos de filtro ultravioleta (UV+: sin filtro, UV-: filtro UV) y riego (riego/estrés).

	UV- riego	UV+ riego	UV- estrés	UV+ estrés
AFE (cm ² /g)	90,93 \pm 7,23	91,4 \pm 11,9	80,77 \pm 1,36	89,52 \pm 0,88
Δ Diámetro (cm)	6,24 \pm 2,24	5,41 \pm 2,30	5,89 \pm 2,41	5,29 \pm 2,21
Biomasa seca radicular (g)	6,95 \pm 2,06	6,30 \pm 2,64	5,95 \pm 2,15	5,54 \pm 1,77
Flavonoides (unidades de absorbancia)	0,15 \pm 0,03	0,14 \pm 0,02	0,14 \pm 0,03	0,14 \pm 0,02

4.2. Altura

Las plantas regadas crecieron significativamente ($p < 0,001$) el doble que las estresadas (Fig. 5). En concreto, el crecimiento en plantas regadas fue un 49,6 % superior. No se detectó ninguna influencia de la radiación UV ($p = 0,2$) ni tampoco de la interacción UV · Riego ($p = 0,7$). Dentro de cada condición hídrica, tanto UV+ como UV- tienen un igual comportamiento.

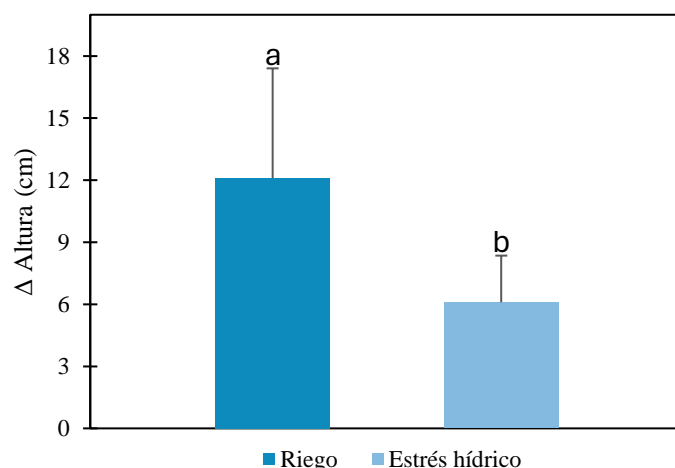


Figura 5: Valores medios y desviación estándar para cada tratamiento de riego (n= 40). Datos de los diferentes tratamientos de filtro UV agrupados al no ser significativo este factor. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de riego.

4.3. Biomasa seca aérea

El peso seco de la parte aérea presentó un comportamiento similar al de la variable altura, al ser más elevado en plantas regadas independientemente del protector UV ($p=0,01$; Fig. 6). No hubo efecto del factor UV ($p=0,3$) ni de su interacción con el riego ($p=0,3$). A diferencia de la altura, las diferencias encontradas no son tan marcadas entre las distintas condiciones hídricas. El peso seco en plantas regadas fue un 18,4% superior.

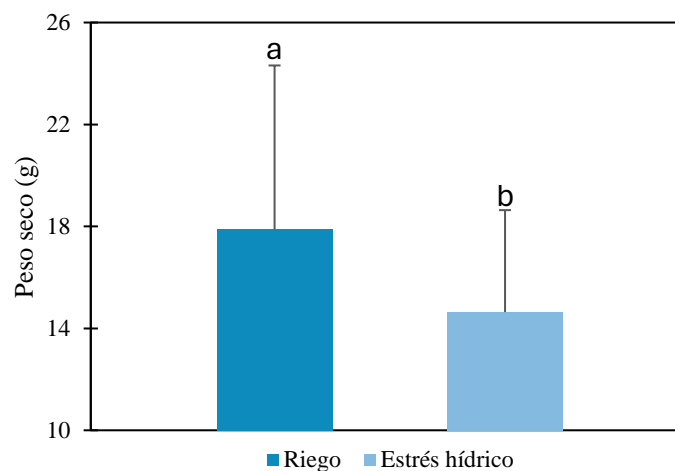


Figura 6. Valores medios y desviación estándar de biomasa aérea al final del experimento para cada tratamiento de riego (n=40). Datos de los diferentes tratamientos de filtro UV agrupados al no ser significativo este factor. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de riego.

4.4. Pigmentos antioxidantes y actividad antioxidante

Las plantas regadas presentaron valores de antocianinas significativamente más elevados que las sometidas a estrés hídrico en la semana 2 y 6 ($P < 0,001$ y $= 0,01$ respectivamente; Fig.7). No hubo efecto del factor UV ($p = 0,5$; $0,7$) ni de la interacción UV · Riego ($p = 0,6$; $0,1$). Para las plantas regadas se observa una constancia de los valores medios en todas las semanas, por lo que las diferencias significativas se deben a la disminución de los valores en plantas no regadas.

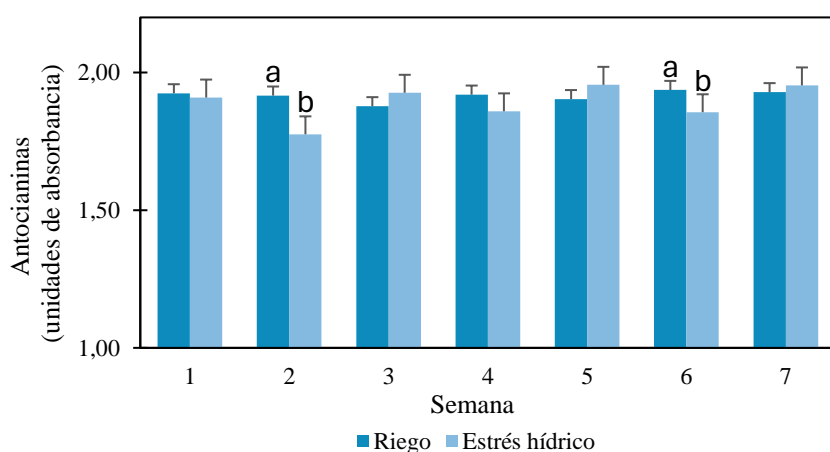


Figura 7: Valores medios y desviación estándar semanales de las antocianinas en plantas regadas y sometidas a estrés hídrico ($n = 20$). Datos de los diferentes tratamientos de filtro UV agrupados al no ser significativo este factor. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de riego dentro de una misma semana.

Con respecto a la actividad antioxidante, se constató una diferencia significativa de la interacción filtro UV · Riego en la semana 4 ($p = 0,008$; Fig. 8). No hubo efecto de los factores UV ($p = 0,1$) ni Riego ($p = 0,1$) por separado. En plantas no regadas, los valores fueron significativamente más elevados en UV+ que en UV- ($p = 0,03$).

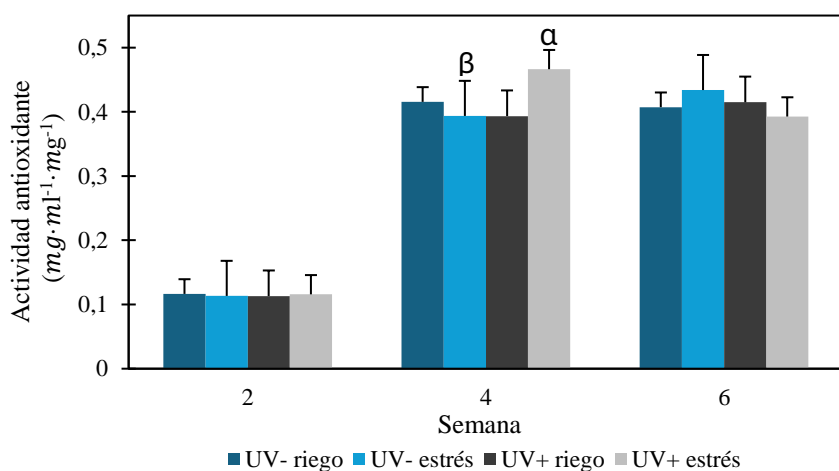


Figura 8: Valores medios y desviación estándar para la concentración de antioxidantes solubles en cada tratamiento (n=5). Símbolos diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de UV para la misma condición de riego dentro de una misma semana.

4.4. Grosor

Los grosores de las hojas en plantas no regadas fueron significativamente superiores al de plantas regadas en la semana 2 ($p < 0,001$; Fig.9). En concreto, los promedios de plantas regadas fueron un 70% inferior. No hubo efectos de la radiación UV ($p = 0,5$) ni de su interacción con Riego ($p = 0,7$).

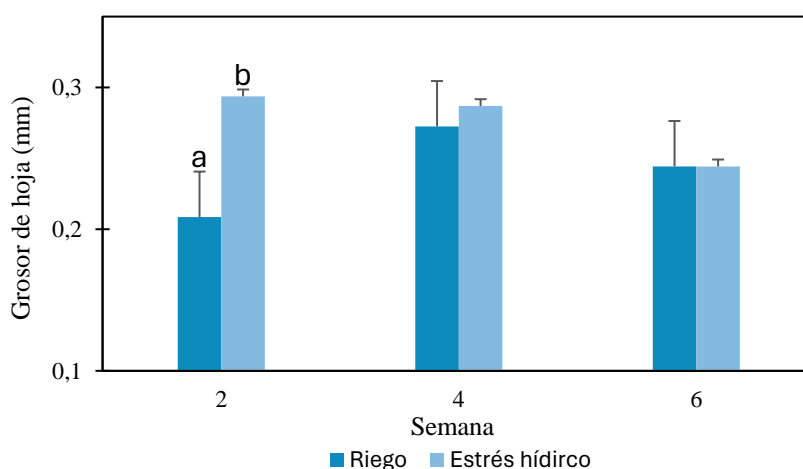


Figura 9: Valores medios y desviación estándar para el grosor foliar en los tratamientos de riego (n=10). Los tratamientos de UV han sido agrupados al no haber significación de este factor sobre la variable. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de riego para una misma semana.

4.5. Clorofila

La clorofila es la única variable donde se ha detectado una influencia exclusiva del factor UV ($p = 0,01$). En la semana 6, el tratamiento UV+ presento valores significativamente más altos que UV- ($p = 0,03$; Fig. 10). No hubo efecto del riego ($p = 0,1$) ni de su interacción con UV ($p = 0,4$).

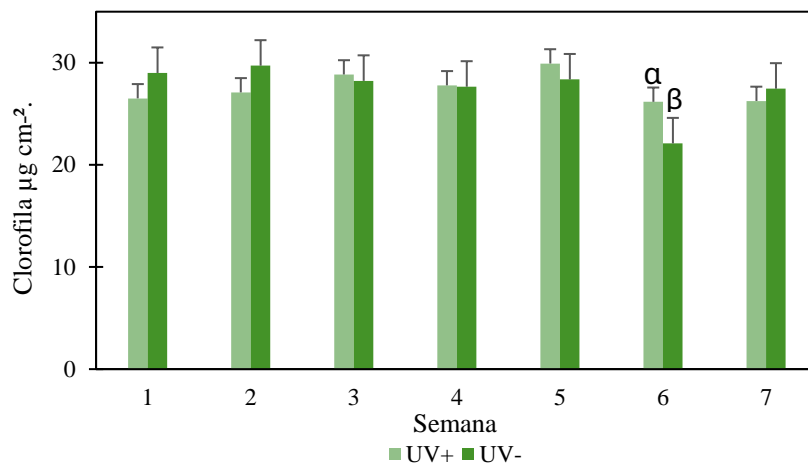


Figura 10: Valores medios y desviación estándar para la clorofila en los tratamientos de UV (UV+: sin filtro; UV-: con filtro). Los tratamientos de riego han sido agrupados al no haber significación de este factor (n=20). Símbolos diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos dentro de una misma semana.

4.6. Aparato fotosintético

Se detectó un efecto del riego (p=0,008) pero no de la radiación UV(p=0,1) ni de la interacción de ambos (p=0,1). En la semana 7, las plantas sometidas a estrés hídrico presentaron valores significativamente más bajos de Fv/Fm que las plantas regadas (p = 0,003; Fig. 11).

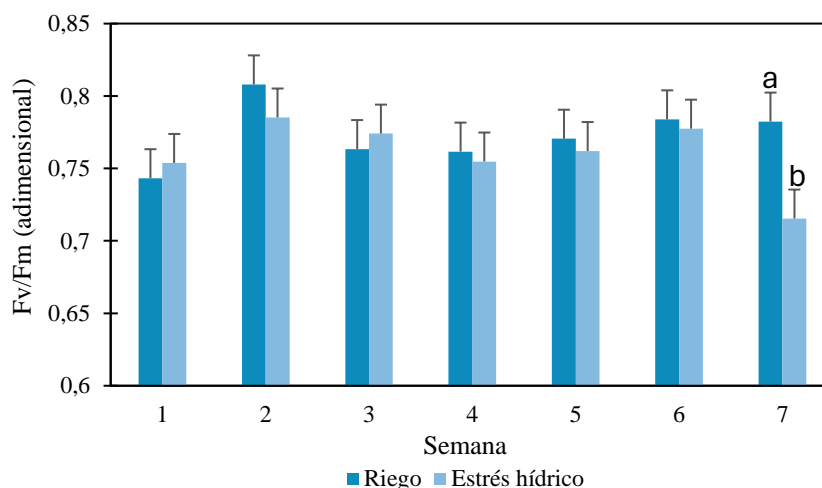


Figura 11: Valores medios y desviación estándar para Fv/Fm en los tratamientos de riego. Los datos de los tratamientos de UV (UV+: sin filtro; UV-: con filtro) han sido agrupados al no detectarse significaciones (n=20). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de riego para una misma semana.

4.7. Evapotranspiración

En las semanas 5 y 7, las plantas regadas presentaron valores de ET significativamente mayor que las sometidas a estrés hídrico ($p < 0,001$; Fig.12). Hubo efecto del riego ($p < 0,001$; $< 0,001$), pero no de la radiación UV ($p = 0,5$; $0,1$) ni de la interacción entre ambos factores ($p = 0,1$; $0,2$). La transpiración fue un 31,7 y 51,9 % mayor en plantas regadas para las semanas 5 y 7 respectivamente.

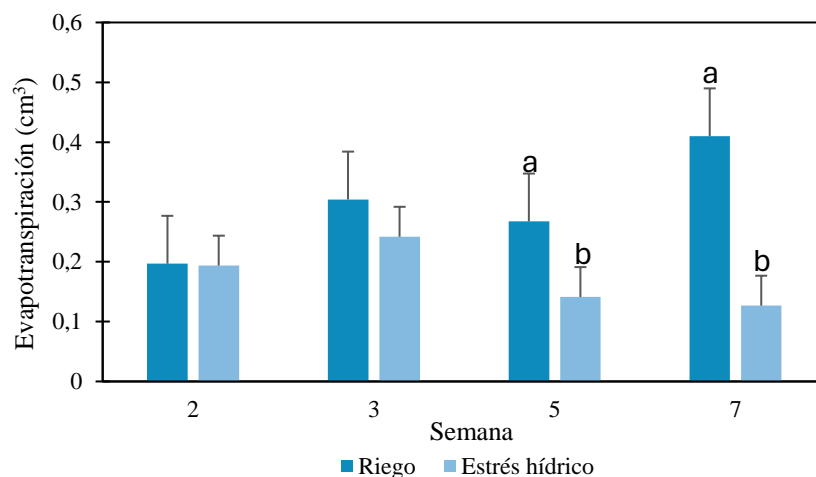


Figura 12: Valores medios y desviación estándar para la evapotranspiración para los tratamientos de riego. Los datos de los tratamientos de UV (UV+: sin filtro; UV-: con filtro) han sido agrupados al no detectarse significaciones ($n=20$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de riego para una misma semana.

5. Discusión

5.1. Estructura foliar

La disminución del grosor de las hojas y el aumento del AFE, son estrategias utilizadas por las plantas para mejorar su relación con el ambiente. En condiciones óptimas, hojas más finas y mayores áreas foliares específicas se relacionan con una mayor eficiencia fotosintética, un mejor intercambio gaseoso y una mayor productividad, ya que existe una mayor área con relación a la masa (Ennajeh et al., 2010). Se espera que una mayor exposición a la radiación ultravioleta se traduzca en un aumento del grosor foliar, disminuyendo a su vez el AFE (Robson y Aphalo 2012). Un mayor grosor equivale a una mayor cantidad de cromóforos y tejido fotosintético hacia capas más profundas de las hojas, capaces de proteger elementos clave como el material genético y cloroplastos frente a la radiación UV (Verdaguer et al., 2012). En nuestro caso, sin embargo, el filtrado de la

radiación UV a través de los protectores no ha ejercido ningún efecto sobre la estructura foliar. Estudios como el realizado por Y. Chen et al. (2019) han detectado este fenómeno.

El factor riego si mostró influencia sobre el grosor de las hojas. Los efectos del contenido hídrico sobre el grosor de hoja son específico de cada especie. Ante una situación de estrés hídrico puede ocurrir un aumento del grosor de hoja como estrategia para conservar el agua y, por tanto, de tolerancia a la sequía. Por otro lado, puede haber una disminución del grosor foliar ya sea por la vulnerabilidad de la planta al estrés hídrico o por el empleo de otro tipo de mecanismos frente al estrés (Khan et al., 2023). Se podría explicar el aumento significativo del grosor en la semana 2, que coincide con valores elevados de temperatura y radiación respecto a la semana anterior, con la capacidad de la faya de activar mecanismos de tolerancia a la sequía, una dinámica comparable a la de otros estudios como el de Ennajeh et al., (2010), donde especies sometidas a déficit hídrico emplearon el aumento del grosor de la hoja como estrategia frente al estrés. La ausencia de estas diferencias en el resto de las semanas quizá se deba al proceso natural de expansión de la hoja, equiparándose el grosor entre plantas regadas y no regadas.

5.2. Crecimiento

El crecimiento de las plantas frente al filtrado de la radiación UV es complejo. Lo habitual es que el filtrado de la radiación UV se traduzca en un mayor crecimiento en altura, biomasa seca (Kataria et al., 2014) y diámetro de la planta Ayala-Tafoya et al. (2011). No obstante, al igual que con los parámetros de la estructura foliar, no se detectó ninguna influencia del factor UV. Aunque no es lo esperado, hay estudios como el de Begum et al. (2021) donde el incremento de altura o biomasa seca puede ser no significativo frente a bajos niveles de radiación UV, concordando estos datos con los resultados obtenidos.

El factor riego si influyó sobre el incremento en altura y la biomasa seca, aunque no para el diámetro. Se espera que el déficit hídrico resulte en un menor crecimiento aéreo pero un mayor desarrollo radicular. Esto viene explicado por la necesidad de la planta de dirigir más energía hacia las raíces para alcanzar agua en capas freáticas más profundas (Barrios et al., 1998). Los resultados obtenidos en esta experimentación se alinean con el de Eziz et al. (2017) donde el crecimiento de la biomasa aérea fue significativamente más reducido para las plantas sometidas a régimen de sequía en comparación a las regadas. El hecho de que las diferencias en la biomasa seca se aprecian únicamente a nivel de la parte

aérea, va ligado a la necesidad de incrementar el desarrollo del sistema radicular de aquellos individuos en situación de sequía. Las plantas sometidas a estrés hídrico impulsan el crecimiento radicular en detrimento del crecimiento aéreo, lo que condujo a la detección de las significaciones observadas. Sin embargo, al verse favorecido el crecimiento del sistema radicular en condiciones de sequía, disminuyen las diferencias entre plantas regadas y sometidas a estrés, lo que justifica la ausencia de significación para esta variable. Con respecto a la altura, como es esperable, las plantas regadas crecen más que las no regadas (Yadav et al., 2020).

5.3. Antioxidantes

La relación de la radiación UV con antocianinas y flavonoides es compleja y depende de la especie. En algunos casos ha sido necesario la aplicación de radiación UV extra con respecto a la ambiental para detectar cambios (Jadidi et al., 2023). En el presente estudio no se reportó ningún efecto del filtrado UV, pero sí se detectó una influencia del riego sobre las antocianinas. Las antocianinas tienden a modificarse al alza ante la sequía, pero cuando el daño oxidativo es superior a los mecanismos de defensa, se ve mermada la síntesis de antioxidantes (Sonntag et al., 2023). Así pues, los niveles de antocianinas significativamente más elevados en plantas regadas vendrían explicado por excesos de daño oxidativo en plantas no regadas, lo que suprime la síntesis de antocianinas y contribuye a las diferencias observadas. Esta interpretación va ligada a las significaciones registradas en otras variables. Las plantas regadas presentaron valores significativamente mayores en incremento de altura, mayor cantidad de biomasa aérea seca, y mejor eficiencia fotoquímica del PSII. Por tanto, una mayor cantidad de antocianinas en plantas regadas no puede venir explicado por una mayor situación de estrés. Los valores de antocianinas en plantas regadas mostraron constancia en las diferentes semanas, siendo los de las plantas no regadas los que presentaron disminuciones puntuales en las semanas donde se detectaron las diferencias significativas (Fig. 7). El hecho de que estas diferencias no se observen como una tendencia general teniendo en cuenta que ha habido periodos temporales con condiciones ambientales más extremas, puede venir explicado porque son semanas en las que los altos valores de temperatura y radiación, en especial los días de las mediciones, se han intercalado con otros días con registros suaves (Fig. 3). Esto hace que la planta experimente un cambio brusco y su capacidad de aclimatación se vea afectada.

Con respecto a la actividad antioxidante, una mayor actividad se asocia a una mayor cantidad de estrés inducido por la radiación UV (Helsper et al., 2003). La correlación significativa entre la actividad antioxidante y la radiación UV observada en este estudio podría estar asociada a las condiciones ambientales. Las diferencias encontradas tuvieron lugar en un día con niveles excepcionalmente altos de radiación, casi el doble de los valores de días anteriores, junto con un incremento de 4°C en la temperatura. La falta de aclimatación previa de las plantas resultó en un marcado pico de actividad antioxidante. El filtrado de la radiación UV mitigó los efectos nocivos de estos cambios abruptos en condiciones de estrés hídrico, lo que indica una interacción entre el estrés hídrico por sequía y el filtrado de la radiación UV. Este fenómeno no se observó en plantas regadas, sugiriendo que una adecuada hidratación de la planta puede conferir resistencia significativa frente al daño oxidativo independientemente del filtrado de la radiación UV.

5.4. Aparato fotosintético

La radiación UV puede afectar a la eficiencia fotosintética disminuyendo el rendimiento fotoquímico del PSII (Celeste Dias et al., 2018), aunque en nuestro caso no se detectó ningún efecto del factor UV. Respecto a los niveles de clorofila, actualmente no existe consenso sobre cuáles pueden ser los efectos de la radiación UV, que parecen depender de la especie. Los posibles escenarios para la clorofila incluyen la ausencia de cambios, disminuciones debidas a la degradación e inhibición de la síntesis, o aumentos, lo que permite incrementar la capacidad de desexcitación de los excesos de radiación por la vía del quenching no fotoquímico (Jovanić et al., 2022). Nuestros datos reflejan el último de los supuestos, donde los niveles de clorofila son significativamente más elevados en plantas irradiadas por radiación UV, lo que facilita la disipación del exceso de energía, coincidiendo además con elevados registros de radiación y temperatura, que el día de la medición superaron los 28°C (día 10-04 en Fig. 3). Esto se corrobora con los resultados obtenidos para la actividad antioxidante, que indican una mayor vulnerabilidad de las plantas no protegidas de la radiación frente al estrés ambiental.

El riego si mostró una influencia significativa sobre el funcionamiento del PSII. El déficit hídrico condujo al deterioro de la capacidad de absorción de energía y a la cadena de transporte electrónico (J. Chen et al., 2021), lo que resultó en reducciones de Fv/Fm. La ausencia de diferencias observadas en otros periodos semanales (Fig.10), se explica por la coincidencia con los registros máximos de radiación y temperaturas, que superaron los

30°C casi todos los días (Fig. 3). Este comportamiento es consistente con investigaciones previas, como las de Hannachi et al. (2022), que mostraron que plantas regadas presentaron valores de eficiencia fotoquímica del PSII más elevados en comparación a las sometidas a sequía.

5.5. Evapotranspiración

Aunque no se puede hacer una distinción entre los valores de evaporación del suelo y transpiración de la planta, se asume que, teniendo en cuenta las dimensiones de la planta y la maceta, la mayor parte del agua es transpirada. Los resultados de evapotranspiración no indican que los tratamientos de UV hayan tenido un efecto significativo. Sin embargo, como era de esperar, sí se observó una influencia del riego. Los factores ambientales como la temperatura, la radiación y el suministro de agua, desempeñan un papel crucial en la regulación de la transpiración principalmente a través del control estomático. Un mayor aporte hídrico permite un mayor escape de agua, por lo que la transpiración no se ve limitada. En condiciones ambientales desfavorables, como la sequía, la transpiración se reduce como una medida de conservación de agua en la planta (Azcón-Bieto & Talón, 2008). No todas las plantas pueden regular la transpiración en función del aporte de agua y las condiciones ambientales (Tang et al., 2022). Sin embargo, se ha identificado una notable capacidad para modular el consumo de agua en la faya bajo condiciones de estrés hídrico, alta radiación y altas temperaturas. Según su comportamiento, ateniendo a los datos obtenidos en las variables de crecimiento, la faya muestra lo que se denomina plasticidad en el desarrollo en situaciones de sequía. Esto significa que la planta puede limitar su crecimiento durante periodos de baja disponibilidad hídrica para evitar alteraciones homeostáticas (Basu et al., 2016).

5.6. Consideraciones generales

Sólo se detectó influencia del factor UV en las variables clorofila y actividad antioxidante. Estas significaciones al tratarse de hechos excepcionales y no registrarse como una tendencia general, impiden evidenciar que los tratamientos UV- hayan tenido un efecto favorable. No obstante, no pueden obviarse como indicios de que puede existir potencialidad del filtrado de la radiación ultravioleta en la disminución del estrés sobre la planta. Tampoco se han obtenidos datos que indiquen un efecto negativo, por lo que la interpretación que se puede hacer de los resultados obtenidos es que el filtrado de la

radiación UV a través de tubos protectores no ha tenido un efecto considerable sobre la fisiología, anatomía ni morfología de las plantas de *Morella faya* (faya).

El bajo impacto del filtrado de la radiación UV detectado en el estudio puede atribuirse a las propias características de la faya. Algunos estudios han demostrado la mínima tasa de descenso de F_v/F_m en condiciones de alta radiación con relación a otras especies con las que coexiste. Además, también se mostró como la planta con mayor capacidad de retomar su eficiencia fotosintética normal tras una situación de estrés (Rodríguez 1998). El trabajo de Asner et al., (2006), concluye que *Morella faya* es capaz de crecer con éxito en situaciones de estrés ambiental, con altas temperaturas y bajas precipitaciones. Precisamente, este comportamiento guarda relación con los resultados obtenidos para el grosor foliar y la reducción de la evapotranspiración, que indican la capacidad de la planta de activar mecanismos de tolerancia frente a situaciones de estrés hídrico.

6. Conclusión

Algunas de las diferencias encontradas sugieren un posible beneficio del filtrado de la radiación UV, aunque la excepcionalidad de estas no permite asumir la idoneidad de la técnica. Por lo tanto, se concluye que el efecto del filtrado de la radiación es neutral, ni perjudicial ni beneficioso. Es crucial continuar investigando esta temática en un mayor número de especies para determinar si, en efecto, el filtrado de a radiación UV es indiferente o si, por el contrario, puede tener efectos positivos o negativos sobre el desarrollo de las plantas. Los hallazgos de este estudio permiten, de momento, avalar el uso de plásticos reciclados para la elaboración de tubos protectores. Además, aunque no formaba parte de los objetivos planteados, se ha obtenido información relevante sobre la tolerancia de la faya a condiciones de estrés hídrico, confirmando su potencial uso para la restauración forestal, dado que ha demostrado ser una especie con notable adaptabilidad a condiciones climáticas desfavorables.

7. Conclusions

Some of the differences found, suggest a possible benefit from filtering UV radiation, although the findings are limited. Therefore, it is concluded that the effect of UV radiation filtering is neutral, neither harmful nor beneficial. It's crucial to continue researching this topic with a larger number of species to determine whether UV radiation filtering is indeed indifferent or whether it can have a positive or negative effects on plant

development. Although it wasn't part of the initial objectives, relevant information has been gathered regarding the tolerance of *Morella faya* (faya) to water stress conditions. The findings of this study currently supports the use of recycled plastics for making tree shelters. Additionally, the potential use of faya for forest restoration could be confirmed, as it has shown remarkable adaptability to unfavourable climatic conditions.

8. Bibliografía

- Abbas, S., Qamer, F. M., Ali, H., Usman, M., Ahmad, A., Salman, A., y Akhter, A. M. (2023). Monitoring of large-scale forest restoration: Evidence of vegetation recovery and reversing chronic ecosystem degradation in the mountain region of Pakistan. *Ecological Informatics*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102277>
- Abe, T. (2022). Effects of treeshelter on seedling performance: a meta-analysis. En *Journal of Forest Research*, 27(3). <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1992700>
- Aphalo, P. J., Albert, A., Björn, L. O., McLeod, A., Robson, T. M. y Rosenqvist, E. (2012). Beyond the visible: A handbook of best practice in plant UV photobiology. COST Action FA0906 UV4 growth. Helsinki: University of Helsinki, Division of Plant Biology. ISBN 978-952-10-8362-4
- Asner, G. P., Martin, R. E., Carlson, K. M., Rascher, U., y Vitousek, P. M. (2006). Vegetation–climate interactions among native and invasive species in Hawaiian Rainforest. *Ecosystems (New York, N.Y.)*, 9(7), 1106–1117. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-0124-z>
- Ayala-Tafoya, F., María Zatarain-López, D., Valenzuela-López, M., Partida-Ruvalcaba, L., de Jesús Velázquez-Alcaraz, T., Díaz-Valdés, T., y Osuna-Sánchez, J. A. (2011). CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE EN RESPUESTA A RADIACIÓN SOLAR TRANSMITIDA POR MALLAS SOMBRA. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 403-410. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000400403
- Azcón-Bieto, J., y Talón, M. (2008). Fundamentos de fisiología vegetal (2ª ed.). McGraw-Hill Interamericana. ISBN 978-84-481-9293-8.
- Núñez Barrios, A., Ritchie, J., y Smucker, A. J. M. (1998). El efecto de sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común. *Agronomía Mesoamericana*, 9(2), 1-8. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/download/19463/19539/>
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., y Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.7678.1>
- Begum, H. A., Hamayun, M., Shad, N., Khan, W., Ahmad, J., Khan, M. E. H., Jones, D. A., y Ali, K. (2021). Effects of UV Radiation on Germination, Growth, Chlorophyll Content, and Fresh and Dry Weights of Brassica rapa L. and Eruca sativa L. *Sarhad Journal of Agriculture*, 37(3), 1016-1024. <https://doi.org/10.17582/journal.sja/2021/37.3.1016.1024>
- Bergez, J. E., y Dupraz, C. (2000). Effect of ventilation on growth of Prunus avium seedlings grown in treeshelters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104(3), 199-214. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00163-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00163-5)
- Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181(4617), 1199-1200. <https://doi.org/10.1038/1811199a0>
- Cabildo de Tenerife. (2022). Estrategia para la Conservación de la Biodiversidad de la Isla de Tenerife 2020-2030. [EBIT diagnostico \(tenerife.es\)](https://www.cabildo.tenerife.es/EBIT-diagnostico-tenerife.es)

- Celeste Dias, M., Pinto, D. C. G. A., Correia, C., Moutinho-Pereira, J., Oliveira, H., Freitas, H., Silva, A. M. S., y Santos, C. (2018). UV-B radiation modulates physiology and lipophilic metabolite profile in *Olea europaea*. *Journal of Plant Physiology*, 222, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.01.004>
- Chau, C., Paulillo, A., Lu, N., Miodownik, M., y Lettieri, P. (2021). The environmental performance of protecting seedlings with plastic tree shelters for afforestation in temperate oceanic regions: A UK case study. *Science of the Total Environment*, 791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148239>
- Chen, J., Zhao, X., Li, Y., Luo, Y., Zhang, Y., Liu, M., y Li, Y. (2021). Physiological responses of *Agriophyllum squarrosum* and *Setaria viridis* to drought and re-watering. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98246-8>
- Chen, Y., Li, T., Yang, Q., Zhang, Y., Zou, J., Bian, Z., y Wen, X. (2019). UVA Radiation Is Beneficial for Yield and Quality of Indoor Cultivated Lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01563>
- Delgadillo Rodríguez, I. P., Montenegro Ruíz, L. C., Pinilla Agudelo, G. A., y Marina Melgarejo, L. (2017). Medición de la fluorescencia de la clorofila a en algas encapsuladas en alginato de calcio. *Acta Biologica Colombiana*, 22(2). <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.56166>
- Ennajeh, M., Vadel, A. M., Cochard, H., y Khemira, H. (2010). Comparative impacts of water stress on the leaf anatomy of a drought-resistant and a drought-sensitive olive cultivar. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85(4), 289-294. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512670>
- Eziz, A., Yan, Z., Tian, D., Han, W., Tang, Z., y Fang, J. (2017). Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis. *Ecology and Evolution*, 7(24), 11002-11010. <https://doi.org/10.1002/ece3.3630>
- FAO. 2021. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 - Informe principal. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Feigin, S. V., Wiebers, D. O., Lueddeke, G., Morand, S., Lee, K., Knight, A., Brainin, M., Feigin, V. L., Whitfort, A., Marcum, J., Shackelford, T. K., Skerratt, L. F., y Winkler, A. S. (2023). Proposed solutions to anthropogenic climate change: A systematic literature review and a new way forward. *Heliyon*, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20544>
- Foschi, E., y Bonoli, A. (2019). The commitment of packaging industry in the framework of the european strategy for plastics in a circular economy. *Administrative Sciences*, 9(1), 18. <https://doi.org/10.3390/admsci9010018>
- Fundación Global Nature. (2010). Manuales de Desarrollo Sostenible 13. Recuperación de ecosistemas forestales de Canarias. <https://fundacionglobalnature.org/>
- Gobierno de Canarias. (2023). Evaluación Ambiental Estratégica del Plan Forestal de Canarias. *Documento IV. Aprobación inicial. Documento IV. Aprobación Inicial.NOV23 FIRMADO.pdf* (gobiernodecanarias.org)
- Gonzalez, A., Chase, J. M., y O'Connor, M. I. (2023). A framework for the detection and attribution of biodiversity change. En *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1881). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0182>
- González Rodríguez, Á. (1998). Caracterización fotosintética de árboles de la laurisilva canaria (*Laurus Azorica*, *Persea indica* y *Myrica faya*). *Tesis doctoral, Universidad de La Laguna*. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/21227>.
- Gu, F., Guo, J., Zhang, W., Summers, P. A., y Hall, P. (2017). From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment*, 601-602, 1192-1207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.278>

- Hannachi, S., Signore, A., Adnan, M., y Mechi, L. (2022). Single and Associated Effects of Drought and Heat Stresses on Physiological, Biochemical and Antioxidant Machinery of Four Eggplant Cultivars. *Plants*, 11(18), 2404. <https://doi.org/10.3390/plants11182404>
- Helsper, J. P. F. G., Ric de Vos, C. H., Maas, F. M., Jonker, H. H., Van Den Broeck, H. C., Jordi, W., Pot, C. S., Keizer, L. C. P., y Schapendonk, A. H. C. M. (2003). Response of selected antioxidants and pigments in tissues of *Rosa hybrida* and *Fuchsia hybrida* to supplemental UV-A exposure. *Physiologia Plantarum*, 117(2), 171–178. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00037.x>
- Jadidi, M., Mumivand, H., Nia, A. E., Shayganfar, A., y Maggi, F. (2023). UV-A and UV-B combined with photosynthetically active radiation change plant growth, antioxidant capacity and essential oil composition of *Pelargonium graveolens*. *BMC Plant Biology*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04556-6>
- Jovanić, B. R., Radenković, B., Despotović-Zrakić, M., Bogdanović, Z., y Barać, D. (2022). Effect of UV-B radiation on chlorophyll fluorescence, photosynthetic activity and relative chlorophyll content of five different corn hybrids. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2022.100115>
- Kataria, S., Devi Ahilya University, Baroniya, S. S., Kanungo, M., y Bhaghel, L. (2014). Effect of Exclusion of Solar UV radiation on Plants. *Plant Science Today*, 1(4), 224–232. <https://doi.org/10.14719/pst.2014.1.4.61>
- Khan, R., Ma, X., Hussain, Q., Chen, K., Farooq, S., Asim, M., Ren, X., Shah, S., y Shi, Y. (2023). Transcriptome and anatomical studies reveal alterations in leaf thickness under long-term drought stress in tobacco. *Journal of Plant Physiology*, 281. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2023.153920>
- Leal Filho, W., Saari, U., Fedoruk, M., Iital, A., Moora, H., Klöga, M., y Voronova, V. (2019). An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 214, 550-558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.256>
- Liović, B., Tomašić, Ž., Dubravac, T., Licht, R., y Turk, M. (2019). The effect of polypropylene tree shelters on growth and survival of pedunculate oak seedlings (*Quercus robur* L.). *South-East European Forestry*, 10(1), 89-96. <https://doi.org/10.15177/see-for.19-07>
- Liu, M., Cao, B., Zhou, S., y Liu, Y. (2012). Responses of the flavonoid pathway to UV-B radiation stress and the correlation with the lipid antioxidant characteristics in the desert plant *Caryopteris mongolica*. *Acta Ecologica Sinica*, 32(3), 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2012.04.004>
- Löf, M., Madsen, P., Metslaid, M., Witzell, J., y Jacobs, D. F. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. En *New Forests*, 50(2), 139-151. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>
- Martin, S. T. (2023). Population growth and deforestation in Amazonas, Brazil, from 1985 to 2020. *Population and Environment*, 45(4). <https://doi.org/10.1007/s11111-023-00438-z>
- Martínez Urreaga, J., Beltrán, F. R., Acosta, J., Aguinaco, T., Fonseca, C., Ochoa, A., Oliet Palá, J. A., González-Sánchez, C., y de la Orden, M. U. (2020). Tube shelters from agricultural plastic waste: An example of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122401>
- Oliet, J. A., y Jacobs, D. F. (2007). Microclimatic conditions and plant morpho-physiological development within a tree shelter environment during establishment of *Quercus ilex* seedlings. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.01.012>
- Oliet, J. A., Puértolas, J., Valenzuela, P., y De Castro, A. V. (2021). Light transmissivity of tree shelters interacts with site environment and species ecophysiology to determine outplanting performance in Mediterranean climates. *Land*, 10(7), 753. <https://doi.org/10.3390/land10070753>

- Puértolas, J., Oliet, J. A., Jacobs, D. F., Benito, L. F., y Peñuelas, J. L. (2010). Is light the key factor for success of tube shelters in forest restoration plantings under Mediterranean climates? *Forest Ecology and Management*, 260(5), 610-617. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.05.017>
- Rai, N., Morales, L. O., y Aphalo, P. J. (2021). Perception of solar UV radiation by plants: photoreceptors and mechanisms. *Plant Physiology* 186(3), 1382-1396. <https://doi.org/10.1093/PLPHYS/KIAB162>
- Robson, T. M., y Aphalo, P. J. (2012). Species-specific effect of UV-B radiation on the temporal pattern of leaf growth. *Physiologia Plantarum*, 144(2), 146–160. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01546>.
- Robson, T. M., Klem, K., Urban, O., y Jansen, M. A. K. (2015). Re-interpreting plant morphological responses to UV-B radiation. *Plant Cell and Environment*, 38(5), 856-866. <https://doi.org/10.1111/pce.12374>
- Rojas-Arévalo, N., Ovalle, J. F., Oliet, J. A., Piper, F. I., Valenzuela, P., Ginocchio, R., y Arellano, E. C. (2022). Solid shelter tubes alleviate summer stresses during outplanting in drought-tolerant species of Mediterranean forests. *New Forests*, 53(3), 555-569. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09872-z>
- Sonntag, F., Liu, H., y Neugart, S. (2023). Nutritional and Physiological Effects of Postharvest UV Radiation on Vegetables: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(26), 9951-9972. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00481>
- Tan, Y. L., Yiew, T. H., Habibullah, M. S., Chen, J. E., Mat Kamal, S. N. I., y Saud, N. A. (2023). Research trends in biodiversity loss: a bibliometric analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 2754-2770. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22211-9>
- Tang, Y. L., Wang, L., Yu, Y., y Lu, D. (2022). Differential response of plant transpiration to uptake of rainwater-recharged soil water for dominant tree species in the semiarid Loess Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(19),4995-5013. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4995-2022>
- United Nations. (2021). COP26. <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- Verdaguer, D., Llorens, L., Bernal, M., y Badosa, J. (2012). Photomorphogenic effects of UVB and UVA radiation on leaves of six Mediterranean sclerophyllous woody species subjected to two different watering regimes at the seedling stage. *Environmental and Experimental Botany*, 79, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.01.008>
- Verkerk, P. J., Delacote, P., Hurmekoski, E., Kunttu, J., Matthews, R., Mäkipää, R., Mosley, F., Perugini, L., Reyer, C. P. O., Roe, S., y Trømborg, E. (2022). Forest-based climate change mitigation and adaptation in Europe. *European Forest Institute*. <https://doi.org/10.36333/fs14>
- Xie, L., Solhaug, K. A., Song, Y., Johnsen, B., Olsen, J. E., y Tollefsen, K. E. (2020). Effects of artificial ultraviolet B radiation on the macrophyte *Lemna minor*: a conceptual study for toxicity pathway characterization. *Planta*, 252(5), 86. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03482-3>
- Yadav, A., Singh, D., Lingwan, M., Yadukrishnan, P., Masakapalli, S. K., y Datta, S. (2020). Light signaling and UV-B-mediated plant growth regulation. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62(9), 1270-1292. <https://doi.org/10.1111/jipb.12932>
- Yagi, T. (2022). The combined effects of tree shelters, large stock and vegetation control on the early growth of conifer seedlings. *Journal of Forest Research*, 27(3), 206-213. <https://doi.org/10.1080/13416979.2022.2048442>