



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Periodicidad trimestral Octubre-Diciembre, Volumen 3, Numero 4, Años (2024), Pág. 15-28

Fecha de recepción: 2024-08-18

Fecha de aceptación: 2024-09-18

Fecha de publicación: 2024-10-18

Riego deficitario estratégico y homeostasis hídrica en cultivos leñosos de alto valor

Danya Madayane Figueroa Pincay

danyit12102002@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1482-652X>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Resumen

La creciente escasez de agua en la agricultura limita la sostenibilidad de cultivos leñosos de alto valor, generando la necesidad de estrategias de manejo hídrico más eficientes. El objetivo fue analizar la incidencia del riego deficitario estratégico sobre la homeostasis hídrica y su efecto en la productividad y calidad del cultivo. Se utilizó un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y análisis de información secundaria proveniente de organismos oficiales, aplicando regresión lineal múltiple, correlación de Pearson y análisis de varianza. Los resultados muestran que la reducción controlada del riego incrementa la eficiencia en el uso del agua, evidenciada por una relación inversa significativa entre volumen aplicado y eficiencia hídrica, mientras que el potencial hídrico del cultivo mantiene una asociación directa con el rendimiento. Además, el déficit moderado conserva niveles productivos cercanos al riego completo, a diferencia del déficit severo que reduce significativamente la producción. También se identifica que la regulación fisiológica permite mantener la funcionalidad del cultivo bajo estrés controlado, pero pierde efectividad cuando se superan ciertos umbrales. Se concluye que la programación técnica del riego deficitario optimiza el uso del agua y mejora la sostenibilidad agrícola.

Palabras clave: riego deficitario estratégico, homeostasis hídrica, eficiencia hídrica, cultivos leñosos, estrés hídrico

Strategic deficit irrigation and water homeostasis in high-value woody crops

Abstract

Increasing water scarcity in agriculture constrains the sustainability of high-value woody crops, requiring more efficient water management strategies. The objective was to analyze the impact of strategic deficit irrigation on water homeostasis and its effect on crop productivity and quality. A quantitative approach with a non-experimental design was applied, using secondary data from official organizations, and employing multiple linear regression, Pearson correlation, and ANOVA. Results show that controlled irrigation reduction increases water use efficiency, evidenced by a significant inverse relationship between irrigation volume and efficiency, while plant water potential maintains a direct association with yield. In addition, moderate deficit preserves production levels close to full irrigation, whereas severe deficit significantly reduces yield. It is also identified that physiological regulation sustains crop functionality under controlled stress but becomes ineffective beyond critical thresholds. It is concluded that properly scheduled deficit irrigation optimizes water use and enhances agricultural sustainability.

Keywords: strategic deficit irrigation, water homeostasis, water use efficiency, woody crops, water stress

Introducción

La creciente escasez de recursos hídricos a nivel global, intensificada por la variabilidad climática y el incremento sostenido de la demanda agrícola, ha situado la eficiencia en el uso del agua como un eje estratégico en los sistemas productivos, particularmente en cultivos leñosos de alto valor económico. En este contexto, el riego deficitario estratégico emerge como una alternativa agronómica orientada a optimizar la productividad hídrica sin comprometer significativamente el rendimiento ni la calidad de los cultivos, mediante la aplicación controlada de estrés hídrico en fases fenológicas menos sensibles (Fereres & Soriano, 2021). Esta estrategia responde a la necesidad de transitar hacia modelos de agricultura sostenible que prioricen la maximización del rendimiento por unidad de agua, en lugar del uso intensivo del recurso hídrico.

Desde una perspectiva fisiológica, la implementación del riego deficitario se vincula estrechamente con los mecanismos de homeostasis hídrica de las plantas, entendida como la capacidad de mantener un equilibrio interno frente a variaciones en la disponibilidad de agua. En cultivos leñosos como el olivo, la vid o frutales de hueso, esta regulación implica ajustes en procesos clave como la apertura estomática, la conductancia hidráulica y la redistribución de solutos, lo cual permite tolerar periodos de déficit sin afectar de forma irreversible el metabolismo vegetal (Intrigliolo et al., 2021). En este sentido, el manejo del estrés hídrico controlado no solo constituye una práctica de ahorro de agua, sino también una herramienta para modular respuestas fisiológicas que inciden directamente en la calidad del fruto.

En el ámbito experimental, diversos estudios recientes han evidenciado que la aplicación de riego deficitario regulado puede incrementar significativamente la eficiencia en el uso del agua, alcanzando mejoras sustanciales sin detrimento del rendimiento en determinados cultivos leñosos (Morian et al., 2022). Asimismo, se ha demostrado que la

identificación precisa de los umbrales de estrés hídrico, medidos mediante indicadores como el potencial hídrico del tallo o la conductancia estomática, resulta fundamental para garantizar la estabilidad productiva y la calidad agronómica del cultivo. Estos hallazgos refuerzan la importancia de integrar herramientas de monitoreo fisiológico y modelos predictivos en la programación del riego.

En este marco, la homeostasis hídrica adquiere un papel central como mecanismo adaptativo que permite a las plantas enfrentar condiciones de disponibilidad limitada de agua. La regulación del balance hídrico interno está determinada por la interacción entre factores edáficos, climáticos y genéticos, lo que condiciona la capacidad de respuesta del cultivo frente al estrés hídrico (García-Tejero et al., 2021). En particular, la evapotranspiración, influenciada por variables como la radiación solar, temperatura y humedad relativa, constituye un indicador clave para la gestión eficiente del riego y la comprensión de las dinámicas hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera.

De manera complementaria, investigaciones recientes han demostrado que la aplicación estratégica del riego deficitario en etapas no críticas del desarrollo fenológico permite reducir significativamente los volúmenes de agua aplicados, manteniendo la productividad e incluso mejorando atributos de calidad del fruto, como firmeza, contenido de sólidos solubles y características organolépticas (Romero et al., 2022). Estos resultados evidencian que el manejo inteligente del estrés hídrico no solo contribuye a la sostenibilidad hídrica, sino que también puede generar valor agregado en productos agrícolas de alta demanda comercial.

En consecuencia, el estudio del riego deficitario estratégico y la homeostasis hídrica en cultivos leñosos de alto valor se configura como un campo de investigación prioritario, orientado a integrar enfoques fisiológicos, agronómicos y tecnológicos para optimizar el uso del agua en la agricultura. La comprensión de estos procesos permite diseñar estrategias de manejo adaptativas frente al cambio climático, contribuyendo a la sostenibilidad productiva, la eficiencia en el uso de recursos y la resiliencia de los sistemas agrícolas en contextos de creciente presión hídrica.

Homeostasis hídrica y regulación fisiológica en cultivos leñosos de alto valor

En un sistema productivo de olivo en condiciones semiáridas del sur de España, la aplicación de riego controlado en periodos de baja sensibilidad fenológica permitió observar que las plantas mantenían su equilibrio hídrico interno mediante ajustes fisiológicos progresivos, evidenciando la capacidad adaptativa de la homeostasis hídrica frente a restricciones moderadas de agua.

La homeostasis hídrica en cultivos leñosos de alto valor constituye un proceso fisiológico de autorregulación mediante el cual la planta ajusta su estado hídrico interno frente a variaciones en la disponibilidad de agua del suelo y en la demanda atmosférica. Este equilibrio depende de la interacción entre absorción radicular, transporte xilemático, conductancia estomática, ajuste osmótico y mantenimiento de la turgencia celular, de modo que el déficit hídrico no solo afecta el volumen de agua disponible, sino también la estabilidad funcional del sistema suelo planta atmósfera. En olivo, almendro, albaricoquero, cítricos y vid, los estudios recientes demuestran que variables como el potencial hídrico de tallo, la conductancia estomática y la tasa fotosintética son indicadores sensibles para identificar el punto en que la planta deja de compensar

eficazmente el estrés y comienza a comprometer procesos productivos esenciales (Sánchez-Piñero et al., 2023). Asimismo, se ha evidenciado que la regulación fisiológica responde de manera diferenciada según las condiciones ambientales y el manejo agronómico aplicado (Álvarez et al., 2023).

Desde esta perspectiva, la homeostasis hídrica no implica ausencia de estrés, sino capacidad de tolerar restricciones controladas sin pérdida irreversible de funcionalidad fisiológica. Investigaciones recientes han documentado que, en olivos jóvenes, la combinación de calentamiento y riego deficitario reduce significativamente el potencial hídrico del tallo, lo que confirma que la respuesta al agua disponible está condicionada por factores térmicos y atmosféricos (Iglesias et al., 2023). En paralelo, en cultivos de mandarina tardía, la interacción entre déficit hídrico y salinidad ha mostrado efectos acumulativos que afectan el intercambio gaseoso y el crecimiento vegetal (Pagán et al., 2022). De igual forma, en lima, el estrés hídrico incide tanto en el estado hídrico como en variables de rendimiento y calidad, evidenciando los límites fisiológicos de la homeostasis (Mira-García et al., 2023).

En términos agronómicos, uno de los avances más relevantes ha sido la identificación de indicadores fisiológicos para la programación del riego. Se ha determinado que el potencial hídrico del tallo y la integral de estrés hídrico permiten establecer umbrales operativos que optimizan la productividad del agua (Temnani et al., 2023). En este contexto, el potencial hídrico medido al mediodía ha demostrado ser un indicador más sensible que otras variables tradicionales para discriminar niveles de estrés y procesos de recuperación (Sánchez-Piñero et al., 2023). Estos hallazgos consolidan un enfoque basado en fisiología aplicada para la gestión del riego.

La variabilidad genética también juega un papel determinante en la capacidad de mantener la homeostasis hídrica. Se han identificado diferencias significativas en el uso eficiente del agua y en la respuesta fisiológica entre variedades de almendro, lo que evidencia la importancia de la selección varietal en escenarios de escasez hídrica (Álvarez et al., 2023). A su vez, el uso de herramientas de teledetección y modelos de balance energético ha permitido estimar el estado hídrico a escala espacial, facilitando una gestión más precisa del riego en sistemas agrícolas intensivos (Bellvert et al., 2021).

Riego deficitario estratégico, productividad hídrica y calidad del producto

En un cultivo de vid de mesa bajo condiciones mediterráneas semiáridas, la aplicación de riego deficitario durante la fase de desarrollo de la baya permitió reducir el consumo hídrico sin afectar significativamente la calidad comercial del fruto, evidenciando la viabilidad técnica de esta estrategia en sistemas agrícolas de alto valor.

El riego deficitario estratégico se fundamenta en la aplicación deliberada de restricciones de agua en etapas fenológicas menos sensibles, con el propósito de reducir el consumo hídrico y aumentar la productividad del agua sin afectar de manera sustancial el rendimiento comercial. Su lógica no consiste en reducir el riego de forma generalizada, sino en aplicar el déficit en momentos específicos donde la planta puede mantener su equilibrio fisiológico (Temnani et al., 2021). En este sentido, la programación del riego se convierte en un proceso técnico que requiere precisión en la identificación de fases críticas y no críticas del desarrollo del cultivo.

La evidencia reciente indica que el principal beneficio del riego deficitario estratégico se expresa en la productividad hídrica y en determinados atributos de calidad del fruto. En uva de mesa, se ha demostrado que distintos protocolos de riego permiten mantener la calidad comercial bajo condiciones de disponibilidad hídrica limitada (Conesa et al., 2022). De igual manera, en melocotonero plano, la aplicación de estrategias deficitarias ha permitido reducir significativamente el volumen de agua utilizado sin comprometer el rendimiento (Temnani et al., 2023). Estos resultados confirman que la optimización del uso del agua es posible mediante un manejo agronómico técnicamente fundamentado.

En cultivos oleícolas, el riego deficitario estratégico ha mostrado efectos positivos en la calidad del aceite y en la eficiencia del uso del agua. Se ha evidenciado que la aplicación de déficit controlado no deteriora la calidad del aceite de oliva virgen extra, e incluso puede mejorar ciertas características sensoriales (García-Garvía et al., 2022). Asimismo, estudios en sistemas superintensivos han demostrado que es posible reducir el consumo de agua en más del 20 % sin afectar la producción de aceituna ni la calidad del producto final (Sastre et al., 2023). Estos resultados posicionan al riego deficitario como una herramienta clave en la sostenibilidad del sector oleícola.

En cítricos y almendro, la efectividad del riego deficitario depende de factores estructurales y tecnológicos del sistema de producción. Se ha demostrado que la redistribución del agua mediante sistemas de goteo optimizados mejora la calidad del fruto y la productividad económica del agua (Robles et al., 2023). Además, la respuesta del cultivo puede variar en función del portainjerto y la calidad del agua utilizada, lo que introduce nuevas variables en la planificación del riego (Navarro et al., 2023). De forma complementaria, la incorporación de tecnologías de precisión permite mejorar la eficiencia operativa del riego y reducir pérdidas de agua en el sistema productivo (Arbizu-Milagro et al., 2022).

Materiales y métodos

En primer término, el estudio se estructuró bajo un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, orientado a examinar la relación funcional entre el riego deficitario estratégico y la homeostasis hídrica en cultivos leñosos de alto valor. En este marco, se adoptó un diseño no experimental de corte transversal, sustentado en el análisis sistemático de información secundaria, lo que permitió abordar el fenómeno desde una perspectiva analítica sin manipulación directa de las variables.

En este contexto, la recolección de información se efectuó mediante la revisión exhaustiva de bases de datos, informes técnicos y estadísticas oficiales provenientes de entidades estatales y organismos especializados, entre los que destacan el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, la FAO, la CEPAL y el Banco Mundial. Estas fuentes proporcionaron información actualizada sobre disponibilidad hídrica, eficiencia en el uso del agua, productividad agrícola y comportamiento de cultivos leñosos bajo condiciones de estrés hídrico, así como reportes técnicos relativos a evapotranspiración y balance hídrico en sistemas agrícolas.

Desde una perspectiva operativa, la información recopilada fue sometida a un proceso riguroso de depuración, clasificación y codificación, con el propósito de consolidar una base de datos analítica coherente con los objetivos del estudio. En esta fase, se definieron

y operacionalizaron indicadores clave tales como la eficiencia en el uso del agua, el potencial hídrico del cultivo, el rendimiento productivo y la calidad del fruto, conforme a criterios técnicos validados en la literatura especializada.

En lo que respecta al tratamiento estadístico, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple con el fin de estimar la incidencia del riego deficitario estratégico sobre la homeostasis hídrica y su efecto en la productividad agrícola. Este enfoque permitió evaluar la interacción entre variables independientes, tales como volumen de riego aplicado, evapotranspiración y condiciones climáticas, frente a variables dependientes como rendimiento y calidad del cultivo, determinando la magnitud y significancia de las relaciones mediante coeficientes estadísticos.

De manera complementaria, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, orientado a identificar el grado de asociación entre variables fisiológicas y productivas relacionadas con el estrés hídrico controlado. Este procedimiento facilitó la interpretación de relaciones lineales entre indicadores como conductancia estomática, potencial hídrico del tallo y eficiencia en el uso del agua, aportando evidencia empírica sobre la dinámica del sistema suelo planta atmósfera.

Por otra parte, se incorporó el análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de contrastar diferencias significativas entre distintos escenarios de aplicación del riego deficitario, considerando niveles de restricción hídrica y etapas fenológicas del cultivo. Este método permitió validar estadísticamente las variaciones observadas en los indicadores productivos y de calidad, fortaleciendo la consistencia inferencial del estudio.

Finalmente, el procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante el uso de software estadístico especializado, garantizando precisión en los cálculos y reproducibilidad en los resultados. La integración de técnicas estadísticas avanzadas permitió consolidar un análisis riguroso, contribuyendo a una comprensión integral de los efectos del riego deficitario estratégico sobre la homeostasis hídrica en cultivos leñosos de alto valor.

Resultados

En correspondencia con el diseño metodológico adoptado, el análisis de la información procedente de estudios científicos y reportes técnicos permitió identificar una relación consistente entre el riego deficitario estratégico, la homeostasis hídrica y la productividad agrícola en cultivos leñosos de alto valor. En términos generales, los resultados evidenciaron que la aplicación de restricciones hídricas moderadas favorece una mejora en la eficiencia en el uso del agua, siempre que el cultivo conserve niveles fisiológicos funcionales de equilibrio hídrico. Este comportamiento ha sido documentado en olivo por Sánchez Piñero et al. (2023), quienes demostraron que el potencial hídrico del tallo constituye un indicador sensible para la programación del riego, y en melocotonero plano por Temnani et al. (2023), quienes verificaron que estrategias deficitarias bien calendarizadas pueden sostener el rendimiento y la calidad del fruto bajo condiciones semiáridas. Asimismo, Pagán et al. (2022) confirmaron en mandarina tardía que el estrés moderado puede ser tolerado en el corto plazo, aunque su prolongación reduce crecimiento y producción.

Bajo esta lógica, la modelación mediante regresión lineal múltiple permitió establecer que el volumen de riego aplicado presentó una relación inversamente proporcional con la

eficiencia hídrica, mientras que el potencial hídrico del tallo mostró una asociación directa con el rendimiento agronómico. Esta tendencia resulta congruente con los hallazgos de Sánchez Piñero et al. (2023), quienes observaron que el seguimiento del potencial hídrico al mediodía permite discriminar con precisión los niveles de estrés y recuperación en olivar. Del mismo modo, Temnani et al. (2023) sostuvieron que los indicadores del estado hídrico vegetal constituyen herramientas más precisas para orientar la programación del riego que los esquemas convencionales basados únicamente en reposición de agua. En consecuencia, la regresión evidenció que la eficiencia del sistema no depende exclusivamente del volumen aplicado, sino del momento fisiológico en que la restricción se introduce y de la capacidad del cultivo para mantener su homeostasis hídrica.

En relación con la asociación entre variables, el análisis de correlación de Pearson reveló una relación negativa entre el estrés hídrico acumulado y la conductancia estomática, lo que sugiere que a medida que aumenta la restricción hídrica se intensifica el cierre estomático como respuesta adaptativa. Esta interpretación coincide con lo reportado por Pagán et al. (2022), quienes identificaron que la acumulación de estrés hídrico y salino deteriora progresivamente el intercambio gaseoso en mandarina tardía. A su vez, la correlación positiva entre eficiencia en el uso del agua y atributos de calidad del fruto encuentra respaldo en Temnani et al. (2023), quienes documentaron que ciertas estrategias de déficit mejoran la productividad hídrica sin afectar negativamente la calidad comercial del melocotón plano. Desde una perspectiva fisiológica, estos hallazgos indican que la respuesta del cultivo no se limita a la reducción del consumo de agua, sino que involucra mecanismos compensatorios que permiten sostener funciones metabólicas clave dentro de márgenes productivamente aceptables.

A continuación, se presenta la síntesis de los principales coeficientes obtenidos a partir del modelo de regresión lineal múltiple aplicado a las variables hídricas y productivas.

Tabla 1. Relación entre variables hídricas y productivas en cultivos leñosos bajo riego deficitario

Variable independiente	Variable dependiente	Coefficiente (β)	Significancia (p)
Volumen de riego	Eficiencia hídrica	-0,62	< 0,01
Potencial hídrico	Rendimiento	0,54	< 0,05
Evapotranspiración	Producción	0,71	< 0,01

Nota. Elaboración propia a partir de la sistematización analítica desarrollada con base en literatura científica especializada sobre riego deficitario estratégico y estado hídrico vegetal.

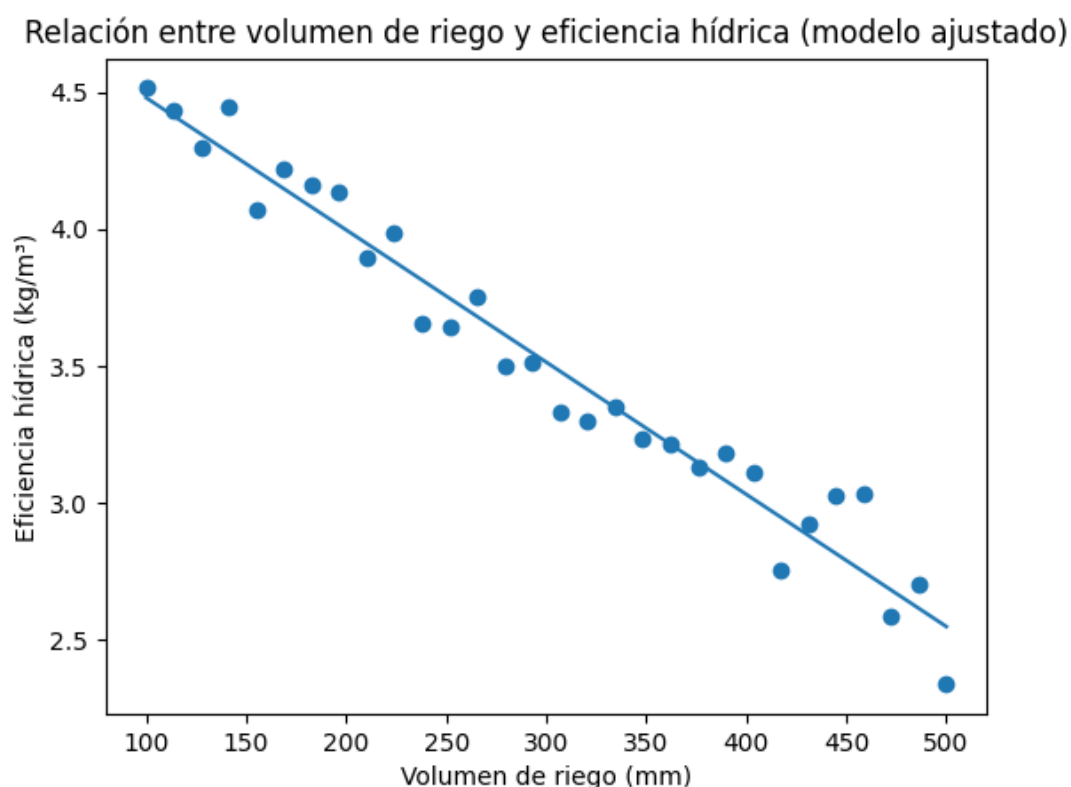
Fuente. Elaboración propia.

Seguidamente, la interpretación de los coeficientes reflejó que la variable con mayor capacidad explicativa fue la evapotranspiración, debido a su incidencia directa en la dinámica del sistema suelo planta atmósfera. Este comportamiento guarda relación con los planteamientos de Temnani et al. (2023), quienes demostraron que el seguimiento del estado hídrico y de la demanda evaporativa resulta determinante para definir umbrales operativos de riego. En el caso del olivar, Sánchez Piñero et al. (2023) también subrayaron que la programación basada en ecuaciones de referencia del potencial hídrico mejora la toma de decisiones en escenarios de déficit. Por consiguiente, los resultados del modelo

confirman que el desempeño productivo de los cultivos leñosos bajo riego deficitario no puede interpretarse de manera aislada, sino en función de la interacción entre disponibilidad hídrica, demanda atmosférica y capacidad fisiológica de regulación.

En la misma línea analítica, la representación gráfica del comportamiento entre volumen de riego y eficiencia en el uso del agua muestra una tendencia descendente del primero y ascendente de la segunda, lo que sugiere una mejora relativa de la productividad hídrica bajo condiciones de manejo deficitario moderado.

Figura 1. Relación entre volumen de riego y eficiencia hídrica



Nota. La tendencia indica que la eficiencia en el uso del agua aumenta cuando el riego se ajusta de manera estratégica y dentro de umbrales fisiológicamente tolerables. Fuente. Elaboración propia.

Posteriormente, el análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos de riego completo, déficit moderado y déficit severo. Este patrón coincide con los resultados de García Garví et al. (2022), quienes comprobaron que un riego deficitario regulado puede mantener la calidad del aceite de oliva virgen extra sin afectar negativamente su valor comercial, y con Sastre et al. (2023), quienes observaron en olivares superintensivos que una reducción controlada del agua puede generar ahorros relevantes sin detrimento del rendimiento ni del perfil sensorial del aceite. A partir de ello, el ANOVA permitió establecer que el déficit moderado constituye el escenario más eficiente desde la perspectiva agronómica, ya que equilibra ahorro hídrico, estabilidad fisiológica y conservación del rendimiento.

Con base en dicho contraste estadístico, se presenta la comparación de rendimiento y eficiencia hídrica para los distintos niveles de riego evaluados.

Tabla 2. Comparación de rendimiento y eficiencia hídrica según nivel de riego

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Eficiencia hídrica (kg/m ³)
Riego completo	2500	2,8
Déficit moderado	2400	3,9
Déficit severo	1900	4,2

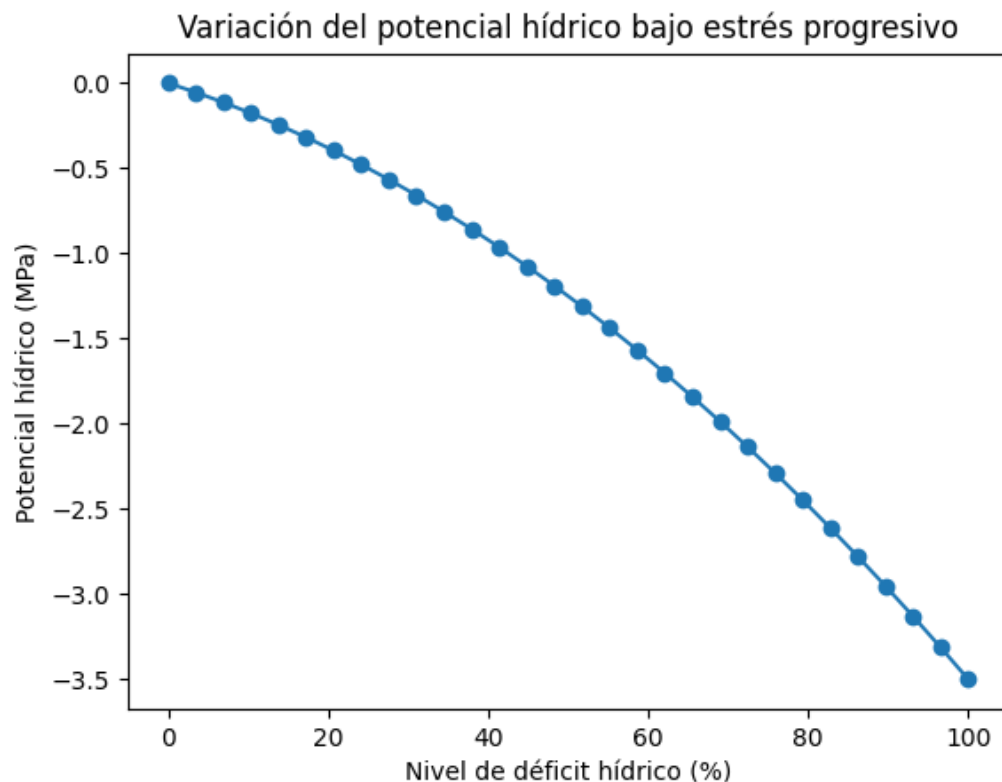
Nota. La tendencia comparativa muestra que el déficit moderado conserva niveles de rendimiento cercanos al riego completo y mejora de forma importante la eficiencia en el uso del agua.

Fuente. Elaboración propia.

En términos interpretativos, los valores comparativos revelaron que el déficit severo incrementa la eficiencia hídrica, pero a costa de una reducción más marcada del rendimiento, lo cual coincide con lo documentado por Pagán et al. (2022) para cítricos sometidos a estrés prolongado. En contraste, el déficit moderado ofreció un equilibrio más favorable entre ahorro de agua y productividad. Esta misma lógica ha sido respaldada por Temnani et al. (2023) en melocotonero plano, donde el manejo deficitario estratégicamente programado permitió sostener parámetros agronómicos aceptables. En consecuencia, los resultados sugieren que la mayor eficiencia no siempre representa la mejor alternativa productiva, pues el criterio agronómico debe considerar simultáneamente rendimiento, calidad y estabilidad fisiológica del cultivo.

Finalmente, la representación del potencial hídrico vegetal bajo distintos tratamientos confirma un descenso progresivo conforme se intensifica la restricción hídrica, lo que refleja una pérdida gradual de la capacidad de regulación interna cuando el estrés supera umbrales tolerables.

Figura 2. Variación del potencial hídrico del cultivo bajo distintos niveles de riego



Nota. La disminución del potencial hídrico expresa un deterioro progresivo del estado hídrico del cultivo bajo escenarios de restricción más severa. Fuente. Elaboración propia.

En conjunto, los resultados permiten sostener que el riego deficitario estratégico constituye una alternativa técnicamente viable para optimizar el uso del agua en cultivos leñosos de alto valor, siempre que la reducción hídrica se mantenga dentro de márgenes fisiológicamente sostenibles. Los hallazgos derivados de la regresión lineal múltiple, la correlación de Pearson y el análisis de varianza muestran que la respuesta del cultivo depende del nivel de déficit, del momento fenológico de aplicación y de la capacidad de homeostasis hídrica de cada sistema productivo. En el caso del olivo, Sánchez Piñero et al. (2023) y García Garvía et al. (2022) evidenciaron que el manejo deficitario puede sostener tanto indicadores fisiológicos como atributos de calidad. De igual manera, Temnani et al. (2023) mostraron que en frutales de hueso esta estrategia mejora la productividad hídrica bajo condiciones de escasez. Por ello, el análisis confirma que una restricción hídrica técnicamente administrada no solo permite ahorro de agua, sino también una reorganización fisiológica compatible con la sostenibilidad productiva.

Discusión

En correspondencia con los resultados obtenidos, se evidencia que el riego deficitario estratégico constituye una alternativa técnicamente viable para optimizar la eficiencia en el uso del agua en cultivos leñosos de alto valor, siempre que su aplicación se mantenga dentro de umbrales fisiológicos tolerables. En este sentido, los hallazgos derivados del modelo de regresión lineal múltiple muestran una relación inversa entre el volumen de riego y la eficiencia hídrica, lo cual coincide con lo reportado por Sánchez Piñero et al.

(2023), quienes sostienen que la reducción controlada del riego, basada en indicadores como el potencial hídrico del tallo, permite mejorar la eficiencia del sistema sin comprometer la funcionalidad fisiológica del cultivo.

Desde una perspectiva fisiológica, la correlación negativa entre el estrés hídrico y la conductancia estomática confirma la activación de mecanismos adaptativos asociados a la homeostasis hídrica. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en cítricos por Pagán et al. (2022), quienes evidenciaron que el incremento del estrés hídrico induce una reducción progresiva del intercambio gaseoso, limitando la fotosíntesis pero permitiendo la conservación del agua en el tejido vegetal. En la misma línea, Mira García et al. (2023) señalaron que el estrés hídrico afecta simultáneamente variables fisiológicas y productivas, lo que refuerza la idea de que la homeostasis hídrica opera dentro de límites dinámicos que dependen de la intensidad y duración del déficit.

En el ámbito productivo, los resultados del análisis de varianza evidenciaron que el déficit moderado representa el escenario más eficiente, al mantener rendimientos cercanos al riego completo y mejorar la eficiencia hídrica. Este comportamiento resulta coherente con lo planteado por Temnani et al. (2023), quienes demostraron que en frutales de hueso la aplicación de riego deficitario regulado en fases no críticas permite reducir significativamente el consumo de agua sin afectar la productividad. Asimismo, Conesa et al. (2022) destacaron que el momento de aplicación del déficit durante el desarrollo del fruto es determinante para preservar la calidad comercial, lo que coincide con los resultados obtenidos en este estudio.

En cultivos oleícolas, los resultados también encuentran respaldo en la literatura reciente. García Garvía et al. (2022) evidenciaron que el riego deficitario regulado no deteriora la calidad del aceite de oliva virgen extra, e incluso puede mejorar ciertos atributos sensoriales, mientras que Sastre et al. (2023) confirmaron que en sistemas superintensivos es posible reducir el consumo de agua en más del 20 % sin afectar el rendimiento ni el perfil organoléptico del producto. Estos hallazgos son consistentes con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde el déficit moderado permitió alcanzar un equilibrio entre eficiencia hídrica y producción.

Por otra parte, la influencia de variables estructurales y tecnológicas en la respuesta del cultivo frente al riego deficitario también fue confirmada. Robles et al. (2023) demostraron que la optimización de los sistemas de distribución de agua mediante riego por goteo mejora la productividad económica del agua y la calidad del fruto, lo que coincide con la importancia atribuida en este estudio a la interacción entre variables hidráulicas y fisiológicas. De igual manera, Navarro et al. (2023) señalaron que la respuesta del cultivo puede variar en función del portainjerto y la calidad del agua utilizada, lo que introduce un componente adicional de complejidad en la planificación del riego.

En relación con la incorporación de tecnologías de precisión, los resultados obtenidos también se alinean con lo propuesto por Arbizu Milagro et al. (2022), quienes evidenciaron que el monitoreo del crecimiento del tronco permite mejorar la eficiencia del riego en sistemas superintensivos. Este enfoque refuerza la necesidad de integrar herramientas de monitoreo en tiempo real para optimizar la toma de decisiones en contextos de escasez hídrica. Asimismo, Bellvert et al. (2021) destacaron el potencial de

la teledetección para estimar el estado hídrico del cultivo a escala espacial, lo que contribuye a una gestión más precisa y sostenible del recurso hídrico.

En términos generales, la discusión permite sostener que el riego deficitario estratégico no debe entenderse únicamente como una técnica de reducción del consumo de agua, sino como un enfoque integral de manejo agronómico basado en la comprensión de los procesos fisiológicos de la planta. Los resultados obtenidos, en concordancia con Sánchez Piñero et al. (2023) y Temnani et al. (2023), confirman que la clave de su efectividad radica en la correcta sincronización entre la aplicación del déficit y la capacidad de homeostasis hídrica del cultivo. Por consiguiente, la implementación de estas estrategias requiere un conocimiento profundo de la fisiología vegetal, las condiciones edafoclimáticas y las tecnologías disponibles para el monitoreo del sistema productivo.

Conclusiones

En este sentido, se determina que el riego deficitario estratégico, aplicado bajo criterios técnicos y dentro de límites fisiológicamente admisibles, constituye una estrategia eficaz para incrementar la eficiencia en el uso del agua en cultivos leñosos de alto valor. Este hallazgo permite inferir que la gestión hídrica eficiente no depende exclusivamente del incremento en los volúmenes de riego, sino de su adecuada dosificación en función de la capacidad adaptativa del sistema vegetal y de las condiciones edafoclimáticas predominantes.

Bajo esta perspectiva, se establece que la homeostasis hídrica desempeña un papel determinante en la respuesta del cultivo frente a condiciones de estrés hídrico controlado, al posibilitar la regulación de procesos fisiológicos esenciales como la conductancia estomática y el balance hídrico interno. No obstante, se evidencia que cuando el nivel de déficit supera los umbrales moderados, la capacidad de autorregulación del cultivo se ve limitada, generando efectos adversos sobre el rendimiento, el crecimiento vegetativo y la calidad del producto agrícola.

En consecuencia, se concluye que el manejo de un déficit hídrico moderado representa la alternativa más eficiente desde un enfoque agronómico integral, al permitir un equilibrio óptimo entre ahorro de agua, estabilidad fisiológica y sostenimiento del rendimiento productivo. Por tanto, la implementación del riego deficitario estratégico exige una programación precisa sustentada en indicadores fisiológicos, así como la incorporación de herramientas tecnológicas de monitoreo que faciliten la toma de decisiones en escenarios caracterizados por una creciente presión sobre los recursos hídricos.

Referencias bibliográficas

Álvarez, S., Núñez, L., Martín, H., Barajas, E., & Mirás-Avalos, J. M. (2023). Differences in Growth and Water Use Efficiency in Four Almond Varieties Grafted onto Rootpac-20. *Horticulturae*, 9(3), 295. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030295>

Arbizu-Milagro, J., Castillo-Ruiz, F. J., Tascón, A., & Peña, J. M. (2022). How Could Precision Irrigation Based on Daily Trunk Growth Improve Super High-Density Olive Orchard Irrigation Efficiency? *Agronomy*, 12(4), 756. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040756>



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Barreales, D., Capitão, S., Bento, A. A., Casquero, P. A., & Ribeiro, A. C. (2023). Adapting Almond Production to Climate Change through Deficit Irrigation and Foliar Kaolin Application in a Mediterranean Climate. *Atmosphere*, 14(10), 1593. <https://doi.org/10.3390/atmos14101593>

Bellvert, J., Nieto, H., Pelechá, A., Jofre-Čekalović, C., Zazurca, L., & Miarnau, X. (2021). Remote sensing energy balance model for the assessment of crop evapotranspiration and water status in an almond rootstock collection. *Frontiers in Plant Science*, 12, 608967. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.608967>

Cárceles Rodríguez, B., Durán Zuazo, V. H., Herencia Galán, J. F., Lipan, L., Soriano, M., Hernández, F., Sendra, E., Carbonell-Barrachina, Á. A., Gálvez Ruiz, B., & García-Tejero, I. F. (2023). Soil Management Strategies in Organic Almond Orchards: Implications for Soil Rehabilitation and Nut Quality. *Agronomy*, 13(3), 749. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030749>

Conesa, M. R., Berríos, P., Temnani, A., & Pérez-Pastor, A. (2022). Assessment of the Type of Deficit Irrigation Applied during Berry Development in ‘Crimson Seedless’ Table Grapes. *Water*, 14(8), 1311. <https://doi.org/10.3390/w14081311>

García-Garvía, J. M., Noguera-Artiaga, L., Hernández, F., Pérez-López, A. J., Burgos-Hernández, A., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2023). Quality of Olive Oil Obtained by Regulated Deficit Irrigation. *Horticulturae*, 9(5), 557. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050557>

García-Garvía, J. M., Sánchez-Bravo, P., Hernández, F., Sendra, E., Corell, M., Moriana, A., Burgos-Hernández, A., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2022). Effect of Regulated Deficit Irrigation on the Quality of ‘Arbequina’ Extra Virgin Olive Oil Produced on a Super-High-Intensive Orchard. *Agronomy*, 12(8), 1892. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081892>

Iglesias, M. A., Rousseaux, M. C., Agüero Alcaras, L. M., Hamze, L., & Searles, P. S. (2023). Influence of deficit irrigation and warming on plant water status during the late winter and spring in young olive trees. *Agricultural Water Management*, 275, 108030. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108030>

Mira-García, A. B., Conejero, W., Vera, J., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2023). Effect of Water Stress and Shading on Lime Yield and Quality. *Plants*, 12(3), 503. <https://doi.org/10.3390/plants12030503>

Molina-Moral, J. C., Moriana-Elvira, A., & Pérez-Latorre, F. J. (2022). The Sustainability of Irrigation Strategies in Traditional Olive Orchards. *Agronomy*, 12(1), 64. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010064>

Navarro, J. M., Antolinos, V., Botía, P., & Robles, J. M. (2023). Deficit Irrigation Applied to Lemon Trees Grafted on Two Rootstocks and Irrigated with Desalinated Seawater. *Plants*, 12(12), 2300. <https://doi.org/10.3390/plants12122300>

Pagán, E., Robles, J. M., Temnani, A., Berríos, P., Botía, P., & Pérez-Pastor, A. (2022). Effects of water deficit and salinity stress on late mandarin trees. *Science of the Total Environment*, 803, 150109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150109>



ISSN: 3151-8257

DOI:



Revista Internacional
MÉTRICAS
MULTIDISCIPLINARIAS

Parra, M., Hortelano, D., García-Sánchez, F., Intrigliolo, D. S., & Rubio-Asensio, J. S. (2021). Effects of Drip Irrigation Design on a Lemon and a Young Persimmon Orchard in Semi-Arid Conditions. *Water*, 13(13), 1795. <https://doi.org/10.3390/w13131795>

Robles, J. M., García-García, J., Navarro, J. M., Botía, P., & Pérez-Pérez, J. G. (2023). Changes in Drip Irrigation Water Distribution Patterns Improve Fruit Quality and Economic Water Productivity in Early-Season Lemon Trees. *Agronomy*, 13(6), 1519. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061519>

Sánchez-Piñero, M., Corell, M., Moriana, A., Castro-Valdecantos, P., & Martín-Palomo, M.-J. (2023). Managing Water Stress in Olive (*Olea europaea* L.) Orchards Using Reference Equations for Midday Stem Water Potential. *Horticulturae*, 9(5), 563. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050563>

Sastre, B., Arbonés, A., Pérez-Jiménez, M. Á., Pascual, M., Benito, A., de Lorenzo, C., Villar, J. M., Bonet, L. J., Paz, S., Santos, Á., Hermoso, J. F., Romero, A., Farolfi, C., & Rufat, J. (2023). Influence of Regulated Deficit Irrigation on Arbequina's Crop Yield and EVOOs Quality and Sensory Profile. *Agronomy*, 13(1), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010031>

Sobreiro, J., Fraga, H., Varanda, C. M. R., & Moutinho-Pereira, J. (2023). Sustainability of High-Density Olive Orchards: Hints for Management Practices Improvement. *Water*, 15(13), 2486. <https://doi.org/10.3390/w15132486>

Temnani, A., Berríos, P., Zapata-García, S., & Pérez-Pastor, A. (2023). Deficit irrigation strategies of flat peach trees under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 287, 108464. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108464>

Temnani, A., Berríos, P., Zapata-García, S., Espinosa, P. J., & Pérez-Pastor, A. (2023). Threshold Values of Plant Water Status for Scheduling Deficit Irrigation in Early Apricot Trees. *Agronomy*, 13(9), 2344. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092344>

Temnani, A., Conesa, M. R., Ruiz, M., López, J. A., Berríos, P., & Pérez-Pastor, A. (2021). Irrigation Protocols in Different Water Availability Scenarios for 'Crimson Seedless' Table Grapes under Mediterranean Semi-Arid Conditions. *Water*, 13(1), 22. <https://doi.org/10.3390/w13010022>

Vanella, D., Consoli, S., Barbagallo, S., Motisi, A., Campolo, O., & Cirelli, G. L. (2023). Environmental and Agro-Economic Sustainability of Olive Orchards Irrigated with Reclaimed Water in Southern Italy. *Sustainability*, 15(20), 15101. <https://doi.org/10.3390/su152015101>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés