



EL RIEGO DEFICITARIO INCREMENTA LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN *Carica papaya* L. †

[DEFICITARY IRRIGATION INCREASES WATER PRODUCTIVITY IN *Carica papaya* L.]

David Trujillo-García¹, Ebandro Uscanga-Mortera¹, Marco A. Otero-Sánchez², Alberto E. Becerril-Román¹, David Jaén-Contreras¹, Eloy Canales-Sosa² and Carlos Trejo^{1*}

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Km 36.5 Carretera México- Texcoco, Montecillo, 56264, Texcoco, Edo de México, México. Email: trujillo.david@colpos.mx, euscanga@colpos.mx, catre@colpos.mx*, becerril@colpos.mx, djaen@colpos.mx

²Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero. Av. Vicente Guerrero 81, Centro 40000, Iguala de la Independencia, Guerrero, México. Email: marco.otero@csaegro.edu.mx, eloy.canales@csaegro.edu.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. In the face of the imminent global water scarcity, it is necessary to implement alternatives to make its use more efficient and ensure agricultural production with minimal expenditure. **Objective.** To determine physiological variables of *Carica papaya* L. under deficit irrigation (DI) which increases water productivity. **Methodology.** The papaya crop was established in semi-protected conditions in a shade house, in pots with a capacity of 60 kg containing sand as substrate. The treatments consisted of applying different water volumes to the substrate: Control, application of 1678 L of water per pot (maximum water retained in the substrate from 89 to 296 days after transplanting (dat), control), Treatment 1, application of 679.79 L of water per pot (41% of the maximum water retained in the substrate from 89 to 296 dat, DI-59) and Treatment 2, application of 573.6 L of water per pot (34% of the maximum water retained in the substrate from 89 to 296 dat, DI-66). The treatments were distributed in a completely randomized block experimental design with six repetitions. Treatments began at 89 and ended at 296 days after transplant (dat). **Results.** Stomatal conductance decreased in DI treatments; therefore, CO₂ assimilation and transpiration were also negatively affected. The water potential of the leaf (Ψ_a leaf) decreased in DI-66 with respect to the control and DI-59. However, no difference was observed between the treatments in the osmotic potential (Ψ_o leaf) and turgor (Ψ_p leaf) of the leaf. The proline concentration increased similarly throughout the experiment in the control and in the treatments with deficit irrigation. **Implications.** Water productivity increased by 2 and 2.9 times in the DI treatments compared to the control. **Conclusion.** The deficit irrigation strategy applied to *C. papaya* L. is relevant because it allows maximizing the productivity of irrigation water in a semi-protected system in subhumid tropic conditions.

Key words: *Carica papaya* L.; irrigation deficit; gas exchange; water relations; proline.

RESUMEN

Antecedentes. Ante la inminente escasez de agua en el mundo, es necesario implementar alternativas para eficientar su uso y asegurar la producción agrícola con un gasto mínimo. **Objetivo.** Determinar variables fisiológicas de *Carica papaya* L. en riego deficitario (RD) que incrementan la productividad del agua. **Metodología.** El cultivo de papaya se estableció en condiciones semiprotectidas en una casa sombra, en macetas con capacidad de 60 kg que contenían arena como sustrato. Los tratamientos consistieron en la aplicación de diferentes volúmenes de agua al sustrato: Testigo, aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt), testigo), Tratamiento 1, aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt, RD-59) y Tratamiento 2, aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt, RD-66). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño

† Submitted December 1, 2023 – Accepted September 10, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5306>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = D. Trujillo-García: <http://orcid.org/0009-0003-6784-9797>; E. Uscanga-Mortera: <http://orcid.org/0000-0002-8951-8724>; M.A. Otero-Sánchez: <http://orcid.org/0000-0002-8475-3135>; A.E. Becerril-R. <http://orcid.org/0000-0001-9975-8492>; D. Jaén-Contreras: <http://orcid.org/0000-0001-5066-3978>; E. Canales-Sosa: <http://orcid.org/0009-0000-2368-8731>; C. Trejo: <http://orcid.org/0000-0003-3431-4828>

experimental de bloques completamente al azar con seis repeticiones. Los tratamientos se iniciaron de los 89 y finalizaron a los 296 días después del trasplante (ddt). **Resultados.** La conductancia estomática disminuyó en los tratamientos de RD; por lo tanto, la asimilación de CO₂ y la transpiración también fueron afectadas negativamente. El potencial de agua de la hoja ($\Psi_{a\text{ hoja}}$), disminuyó en el RD-66 con respecto al testigo y al RD-59. Sin embargo, no se observó diferencia entre los tratamientos en el potencial osmótico ($\Psi_{o\text{ hoja}}$) y de turgencia ($\Psi_{p\text{ hoja}}$) de la hoja. La concentración de prolina aumentó de manera similar a lo largo del experimento en el testigo y en los tratamientos con riego deficitario. **Implicaciones.** La productividad del agua se incrementó en 2 y 2.9 veces en los tratamientos de RD en comparación con el testigo. **Conclusión.** La estrategia de riego deficitario aplicado en *C. papaya* L. es relevante debido a que permite maximizar la productividad del agua de riego en un sistema semiprotectado en condiciones de trópico subhúmedo.

Palabras clave: *Carica papaya* L.; riego deficitario; intercambio de gases; relaciones hídricas; prolina.

INTRODUCCIÓN

La población humana se ha incrementado en más del 21 % del 2000 al 2020 (The World Bank, 2022), generando problemas socioeconómicos y ambientales (Sadigov, 2022). Dentro de los problemas ambientales, las variaciones climáticas son las más importante debido a que alteran el ciclo del agua (Dolan *et al.*, 2021). Estudios han demostrado que la temperatura global aumentará de 1.5 a 2 °C y la precipitación pluvial en algunas regiones será intensa, y en otras, la sequía será de gran magnitud (IPCC, 2021). Por esta razón se estima que para 2050 más del 80 % de las tierras agrícolas padecerán algún nivel de sequía (Liu *et al.*, 2022). Actualmente, más del 40 % de la población del mundo padece algún nivel de escasez de agua (Schmeier, 2022). Con las variaciones climáticas y el cambio de uso de suelos se pronostican escenarios de escasez del agua que afectarán la agricultura y la disponibilidad de alimentos en diversas regiones (Liu *et al.*, 2022). En países desarrollados, se utilizan técnicas avanzadas que mejoran la eficiencia en el uso del agua, mientras que las naciones en desarrollo utilizan prácticas inadecuadas (Wu *et al.*, 2024). Las plantas en escasez de agua desencadenan diversas reacciones funcionales para minimizar los efectos negativos en el crecimiento y producción. El cierre parcial de los estomas es una de las primeras reacciones ante un déficit hídrico, limitando en mayor magnitud la pérdida del vapor de agua por transpiración, que la fijación de bióxido de carbono para la fotosíntesis (Osakabe *et al.*, 2014). Se tiene evidencia de que este cierre inicial de los estomas se debe a una señalización química entre la raíz y vástago, aunque no existan cambios en el potencial de agua en el vástago (Jones, 1980). Además de esta reacción existe otro tipo de respuesta, como es la biosíntesis y señalización de reguladores de crecimiento y metabolitos secundarios. Estos cambios pueden tener efectos significativos en la calidad y valor nutricional del fruto (Shiade *et al.*, 2024).

Ante tal proyección y efectos, la agricultura enfrenta el reto de producir alimentos con una mayor eficiencia en el uso del recurso hídrico. Un ejemplo de ello es *C.*

papaya L., un frutal tropical ampliamente producido y consumido en todo el mundo (Burns *et al.*, 2023). A nivel mundial, el consumo per cápita es de 1.89 kg persona⁻¹ año⁻¹ (FAOSTAT, 2024). En países desarrollados, el consumo es alto debido a la amplia disponibilidad y al reconocimiento de sus beneficios para la salud y valor nutricional (Adeoye *et al.*, 2024), incluso en países que no son productores de este fruto (FAOSTAT, 2024). En México, en el año 2021 se cultivaron 21,000 ha de *C. papaya* L., de las cuales el 87 % fue en sistema de riego tecnificado (SIAP, 2022), con un valor de la producción de 6.32 mil millones de pesos (SIAP, 2022; FAO, 2022). Debido a la necesidad tan grande de agua por este cultivo, es importante maximizar la productividad del agua de riego (Islam *et al.*, 2022) y la información generada en *C. papaya* permitirá entender las posibles reacciones fisiológicas y cambios en el desarrollo en otros frutales y sobre todo, permitirá tener estrategias de riego para no afectar la rentabilidad. La productividad del agua considera estrategias y tecnologías que nos permiten el ahorro de agua y para ello es importante implementarlas a través del uso de calendarios de riego, cobertura del suelo, riego deficitario y respuestas fisiológicas, entre otras (Zapata *et al.*, 2024). El riego deficitario permite maximizar la productividad del agua de riego, la cual es aplicable a cualquier cultivo. Esta técnica consiste en disminuir en un 20 a 50 % la cantidad de agua aplicada de acuerdo a las etapas fenológicas de la planta, lo que provocará reacciones fisiológicas, tales como, disminución del área foliar, cierre parcial de los estomas, disminución del vigor vegetativo, etc., que indirectamente disminuirán el consumo del agua, pero sin afectar significativamente el rendimiento y mejorar su calidad nutracéutica (Galindo *et al.*, 20018). *C. papaya* L., es considerado un frutal sensible a la sequía, por su alto requerimiento hídrico y su corta vida productiva (Carr, 2013; Campostrini *et al.*, 2018), requiere, entre 8,160 a 10,500 m³ de agua por ha (Mellado-Vázquez *et al.*, 2005); y, por lo tanto, tiene una huella hídrica alta. En *C. papaya* L., el estrés hídrico afecta directamente el intercambio de gases (de Lima *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2021) debido al cierre estomático por la señalización química de la raíz al vástago (Luo *et al.*,

2021), lo cual, dependiendo de su magnitud determina el rendimiento de las plantas (Santos *et al.*, 2021). Un riego deficitario moderado aumenta la productividad del agua (Santos *et al.*, 2021); además, el riego deficitario disminuye el gasto de agua en los cultivos en un 20 a 50 % sin afectar su rendimiento (Carbonell-Barrachina *et al.*, 2014; de Lima *et al.*, 2015). Por lo que, el objetivo de la presente investigación fue determinar variables fisiológicas de *C. papaya* L. y determinar la productividad del agua con riego deficitario en *C. papaya*, en un sistema semiprotegido en condiciones de trópico subhúmedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y condiciones del área experimental

El experimento se desarrolló en una casa sombra en el vivero “Valerio Trujano” del Centro de Estudios Profesionales del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero. La temperatura tuvo una variación de 13 a 41 °C, la humedad relativa de 32 a 83 % y el promedio de la radiación fotosintéticamente activa fue de 760 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (obtenido con un medidor/data-logger PAR-MQ-200).

Semillero y manejo del experimento

Las plantas, provenientes de semillas, que se utilizaron fueron del híbrido MSXJ de papaya, tolerantes a temperaturas mayores a 35 °C durante la etapa de floración y menor presencia de frutos carpeloides (Mirafuentes y Santamaría, 2014). La semilla fue colocada en 2 L de agua por 24 h para su imbibición inicial, posteriormente se enjuagaron y se colocaron en 5 L de agua con $\frac{3}{4}$ de una aspirina efervescente, 0.25 g L⁻¹ de Gibiotin (ácido giberélico al 10 %, Biochem Crop and Care Systems) y 1 g L⁻¹ de agua de mancozeb (mancozeb al 80 %) por 48 h. Luego se distribuyeron sobre una tela de algodón, la cual se enrolló. Las semillas germinaron a los cuatro días. Posteriormente, se sembraron en bolsas de polietileno de 8 cm de ancho y 12 de largo, que contenían tierra de monte y tierra lama (1:1). Cuando las plantas tenían una altura de 25 cm (30 días después de la emergencia) se trasplantaron, en macetas con capacidad de 60 kg que contenían arena de río como sustrato, en el cuello del tallo y sobre la maceta se colocó una cubierta de plástico negro para evitar el desarrollo de malezas y que el agua de lluvia interfiriera con los tratamientos. El control de plagas y enfermedades se hizo bajo un manejo agronómico integral; en donde se utilizó el caldo sulfocálcico y bordelés. Se utilizó un sistema de riego con goteros autocompensados (8 L h⁻¹). Previo a la aplicación de los tratamientos, las macetas se regaron diariamente cerca de su capacidad de campo. El suministro de nutrimentos se realizó por fertirriego cada 15 días bajo el plan de nutrición de N total 254-P₂O₅ 72- K₂O 395- Ca 138- MgO 63, con fuentes de

Ultrasol inicial, de desarrollo y crecimiento, diluyendo cinco kg en un tinaco de 5000 L de agua, el pH se reguló (5.5-6.0) con ácido fosfórico.

Capacidad de retención de agua en la maceta y diseño de tratamientos

Cinco macetas con 60 kg de arena seca se saturaron de agua y se pesaron, (báscula de plataforma 100 kg/10 g, RHINO) posteriormente se dejaron drenar por 24 h y se volvieron a pesar, por diferencia de peso se determinó que la capacidad de campo de la arena fue de 8.18 L. Con este resultado se determinaron tres tratamientos, basados en la capacidad de campo de 8.18 L; el testigo que se mantuvo a capacidad de campo (CC) durante el tiempo que duró el experimento (1678 L de agua por maceta, volumen total aplicado) y dos tratamientos de riego deficitario (RD) RD-59 (679.79 L de agua maceta; 41 % del agua máxima retenida en el sustrato) y RD-66 (573.6 L de agua por maceta; 34 % del agua máxima retenida en el sustrato), utilizando el método gravimétrico. Los tratamientos (volúmenes de agua) se aplicaron desde los 89 (etapa fenológica de amarre de frutos) hasta los 296 días después del trasplante (ddt). El experimento se condujo en un diseño de bloques completamente al azar con seis repeticiones, la unidad experimental consistió en una planta.

Variables registradas

Intercambio de gases

Cada siete días a partir del inicio de tratamientos (89 hasta los 254 ddt), en seis plantas por tratamiento, se midió el intercambio de gases con un analizador portátil de gases en el espectro infrarrojo (IRGA, CIRAS-3, PPSsystem) en el lóbulo central de una hoja joven completamente expandida (dos semanas de edad) a las 12:00 h. Se consideraron: conductancia estomática (g_s , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), asimilación de CO₂ (A , $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y transpiración (E , $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Potencial de agua (Ψ_a hoja), osmótico (Ψ_o hoja), de turgencia (Ψ_p hoja) y contenido de prolina

Cada una de estas variables se registró por tratamiento a los 53, 80, 103, 131, 159 días después de la aplicación de los tratamientos (ddat) en seis hojas completamente expandidas de la parte media del dosel de la planta. El Ψ_a hoja se determinó en el lóbulo medio de la hoja con una cámara de presión tipo “Scholander” (Soil Moisture model 3115, Santa Barbara, CA., EE. UU.), el Ψ_o hoja se midió en el lóbulo derecho de la lámina de la hoja, éste se envolvió en papel aluminio y se almacenó en nitrógeno líquido. En el laboratorio, las muestras se descongelaron y se introdujeron en

jeringas hipodérmicas para obtener la savia, la cual se depositó en viales Eppendorf. Posteriormente, se tomó una alícuota de 10 μL y se colocó en un disco de papel filtro dentro del portamuestras de un osmómetro de presión de vapor (Wescor Vapor 5520, Wescor, Inc., Logan, Utah, EUA), con la lectura obtenida se calculó el $\Psi_{o \text{ hoja}}$, utilizando la ecuación de Van't Hoff; el $\Psi_p \text{ hoja}$, se obtuvo por diferencia de la fórmula general del $\Psi_{a \text{ hoja}}$ ($\Psi_a = \Psi_o + \Psi_p$). La concentración de prolina en la hoja se determinó en el tejido de la hoja previamente liofilizado y siguiendo la técnica propuesta por Bates *et al.* (1973).

Rendimiento y productividad del agua

Desde el inicio de los tratamientos (la etapa de “amarre de fruto”) en seis plantas por tratamiento se realizó la cuantificación de frutos amarrados por planta. La cosecha se realizó cuando la cáscara del fruto mostró una raya amarillo-naranja en la punta (De los Santos *et al.*, 1997). Se consideraron seis frutos (un fruto por planta o repetición) por tratamiento para determinar el peso promedio por fruto. El rendimiento por planta se determinó con la ecuación siguiente:

$$\text{Rendimiento (kg planta}^{-1}\text{)} = \text{Frutos amarrados planta}^{-1} \times \text{Peso promedio de fruto}$$

La productividad del agua se determinó utilizando la siguiente ecuación (Igbadun *et al.*, 2006):

$$\text{Productividad del agua (PA)} = \text{Rendimiento (kg planta}^{-1}\text{)} / \text{el volumen de agua total aplicado por planta (VA)}$$

Análisis de datos

A los datos se les realizó la verificación de supuestos (homogeneidad de varianzas a través de la prueba de Bartlett y normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk), así como un análisis de varianza y comparación de medias Tukey ($\alpha \leq 0.05$) con RStudio versión 4.0.2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Intercambio de gases

En general, en el intercambio de gases se observaron diferencias ($P \leq 0.05$) entre tratamientos posterior a los 7 ddat (Figura 1A-C). La conductancia estomática disminuyó 39 y 53 % en RD-59 y RD-66, respectivamente, comparada con el testigo (Tabla 1);

lo cual se reflejó en la disminución de la asimilación de CO_2 (29 % en RD-59 y 46 % en RD-66, comparada con el testigo) y en la disminución de la transpiración (18 % en RD-59 y 29 % en RD-66 comparada con el testigo) (Tabla 1). Lo anterior demuestra que, las plantas en estrés hídrico modifican sus procesos fisiológicos, uno de ellos es el cierre parcial de los estomas, el cual disminuye la transpiración, y, por lo tanto, aumenta la eficiencia de la productividad del agua (Raja *et al.*, 2020). El cierre estomático es la primera respuesta de defensa de las plantas al estrés hídrico, y se debe principalmente a la síntesis y redistribución de ácido abscísico (ABA) en la raíz, el cual es transportado hacia la parte aérea en la corriente de transpiración. En la parte aérea, debido a cambios en el pH en el apoplasto y simplasto se lleva a cabo una liberación del ABA de compartimentos intercelulares hacia el apoplasto, lo cual inicia una respuesta de señalización celular en cascada, la cual culmina en el cierre de los estomas (Karanja *et al.*, 2021).

Trabajos en papaya (de Lima *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2021) mostraron una tendencia similar en la conductancia estomática al aplicar riego deficitario, con reducciones del 46 al 33 % comparado con el testigo, en el presente estudio se presentó una reducción de 46 % en promedio comparado con el testigo. Es importante resaltar que la conductancia estomática tiene efectos directos e indirectos que repercuten en la transpiración, asimilación de CO_2 , en el rendimiento y consecuentemente en la productividad del agua del cultivo (Liao *et al.*, 2022).

Relaciones hídricas y contenido de prolina

En el potencial de agua ($\Psi_{a \text{ hoja}}$) no presentaron diferencias ($P \leq 0.05$) entre el testigo y el tratamiento RD59; mientras que en el RD66 fue diferente a los anteriores desde el inicio hasta el final de la aplicación de los tratamientos. Las diferencias fueron mayores a los 53 y 80 ddat, y se redujeron días posteriores a la aplicación de los tratamientos y volvieron a ser mayores a los 159 ddat. El potencial de agua ($\Psi_{a \text{ hoja}}$) en los tres tratamientos fue mayor a los 53 ddat con respecto a los 80 ddat; sin embargo, aumentó a los 103 y 131 ddat y disminuyó a los 159 ddat. (Figura 2 A). En promedio, el RD-66 disminuyó significativamente ($P \leq 0.05$) el potencial de agua de la hoja en 18.3 % (Tabla 2). En el potencial osmótico de la hoja no se observaron diferencias significativas en la mayoría de los muestreos, excepto a los 103 ddat, en donde en el

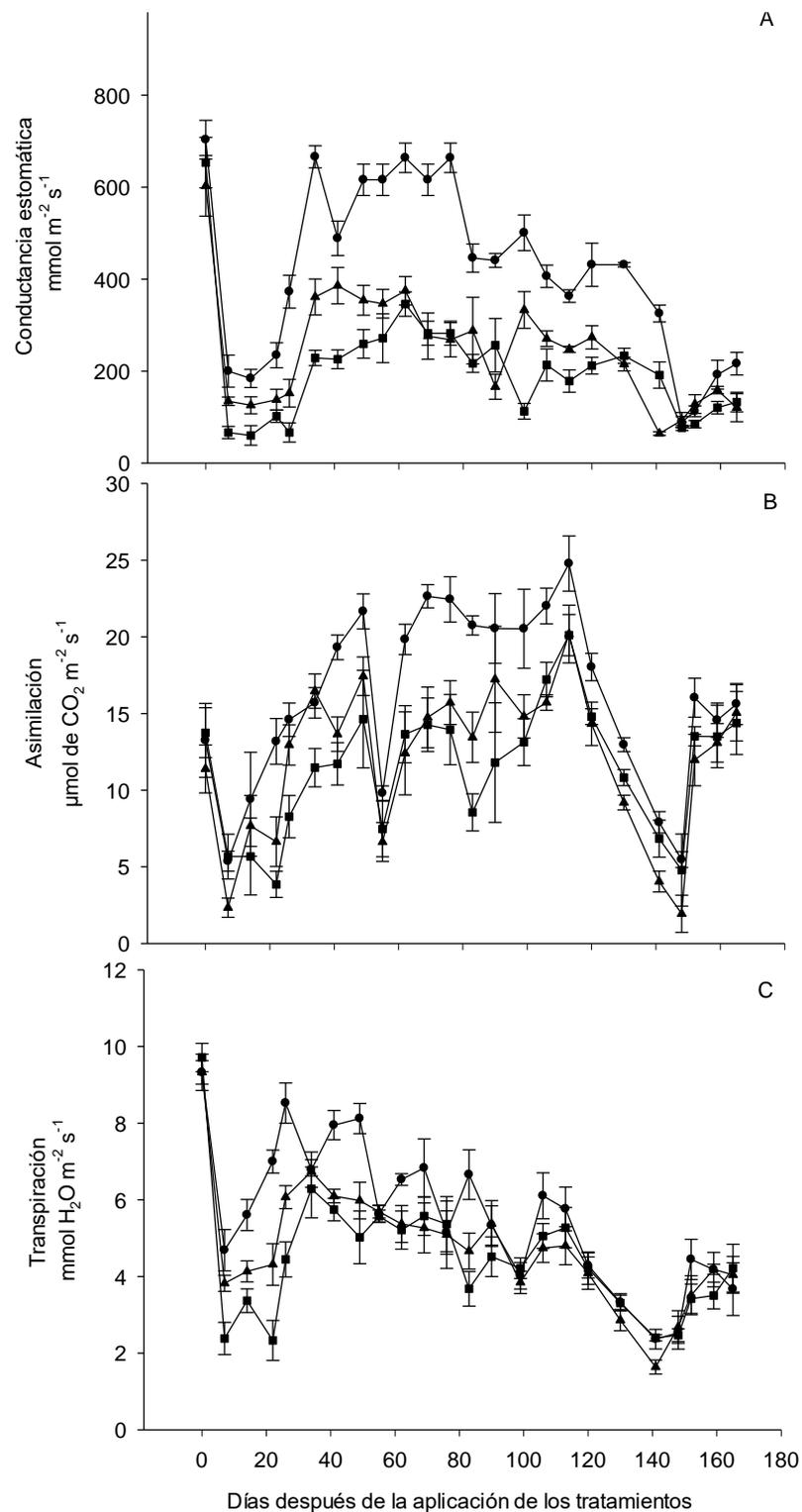


Figura 1. Dinámica de la conductancia estomática (A), asimilación (B) y transpiración (C) en *Carica papaya* L., en diferentes humedades del sustrato: testigo (●), aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt)), RD-59 (▲), aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt) y RD-66 (■), aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt). Los puntos son el promedio de seis repeticiones \pm el error estándar.

Tabla 1. Conductancia estomática, asimilación de dióxido de carbono y transpiración promedio durante 207 días después de la aplicación de los tratamientos en *C. papaya* L. en diferentes humedades del sustrato: testigo, aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt), RD-59, aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt) RD-66, aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt).

Tratamientos	Conductancia estomática mmol m ⁻² s ⁻¹	Asimilación μmol de CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	Transpiración mmol de H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Testigo	394.5 ± 87 a	14.4 ± 2.1 a	5.95 ± 0.98 a
RD-59	239 ± 66 b	10.2 ± 1.8 b	4.86 ± 0.81 b
RD-66	184 ± 48 c	7.85 ± 0.7 c	4.20 ± 0.78 c
P<0.05	**	**	**

NS= No significativo; *= Significativo a $\alpha \leq 0.05$ mediante Tukey. Los datos son el promedio \pm el error estándar, n= 5.

RD-66 fue menor. En la Figura 2B se observa que el potencial osmótico de la hoja aumentó conforme aumentaron los días de aplicación de los tratamientos. Sin ser estadísticamente significativo, el $\Psi_{o \text{ hoja}}$ del tratamiento con mayor déficit hídrico (RD-66) que tuvo el valor menor en relación al testigo, esta tendencia se mantuvo hasta el final del experimento. En el promedio del potencial osmótico en los ddat no se observó diferencia significativa (Tabla 2). En el potencial de turgencia ($\Psi_{p \text{ hoja}}$) no se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos. La tendencia de dicho potencial en los tres tratamientos fue a disminuir conforme se incrementaron los días de aplicación de los tratamientos, pero sin alcanzar el valor de cero, excepto a los 159 ddat, donde se registraron valores de cero o menores para el tratamiento de mayor déficit hídrico (RD-66), lo cual indica una pérdida de turgencia en los tejidos de las plantas (Figura 2C). En el promedio del potencial de turgencia en los ddat no se observó diferencia significativa (Tabla 2). Los resultados del potencial de agua coinciden con lo reportado en nectarinas (Scalisi *et al.*, 2019), y cerezo (Blaya-Ros *et al.*, 2021), donde el potencial de agua de las plantas en déficit de riego fue inferior al testigo.

El ajuste osmótico en los tejidos de las plantas, es un mecanismo que usan las plantas para mantener su turgencia y por lo tanto, mantener el crecimiento celular y funciones importantes como la apertura y cierre de los estomas (Mahmood *et al.*, 2020). La acumulación de solutos en el citoplasma de la célula, en respuesta al cambio en el potencial de agua inducido por falta de agua, asegura la turgencia de la célula y supervivencia de las plantas. La síntesis de prolina es un osmolito que juega un papel fundamental como un osmoprotector en la hoja de las plantas (Oztürk *et al.*,

2021; Ghaffari *et al.*, 2021), para regular la turgencia celular, manteniendo un buen funcionamiento estomático y evitar un impacto negativo en la expansión celular (Oztürk *et al.*, 2021). En *C. papaya* L., se encontró un incremento gradual de prolina en los días posteriores a la aplicación de los tratamientos y mayor concentración en los dos tratamientos de riego deficitario (RD-59 y RD-66) en comparación con el testigo (Figura 3), sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Tabla 2).

La respuesta observada en el cultivo de papaya es muy común observarla en diferentes especies como resultado de estrés hídrico, el cual provoca alteraciones generales en los procesos fisiológicos, limitando además la absorción de agua por las raíces, además asociándose a una alta demanda de humedad debido a una baja humedad relativa, alta temperatura y radiación (Giménez *et al.*, 2013).

Rendimiento y productividad del agua

El rendimiento por planta (kg planta⁻¹) presentó una disminución de 21 y 3 % en los tratamientos RD-59 y RD-66, respectivamente, en comparación con el del testigo; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Manjunath *et al.* (2017) consignó que, al aplicar riego deficitario de 417 L planta⁻¹ en papaya, el rendimiento disminuyó 49 %, este valor es más del doble del registrado en esta investigación (Tabla 3). Mirafuentes y Santamaría (2014), reportaron que el híbrido MSJX de papaya en condiciones de riego de acuerdo con la demanda de evapotranspiración produjo 57 kg planta⁻¹, este valor es casi el doble al encontrado en el presente estudio, esta diferencia se podría deber a las condiciones de producción que ellos utilizaron.

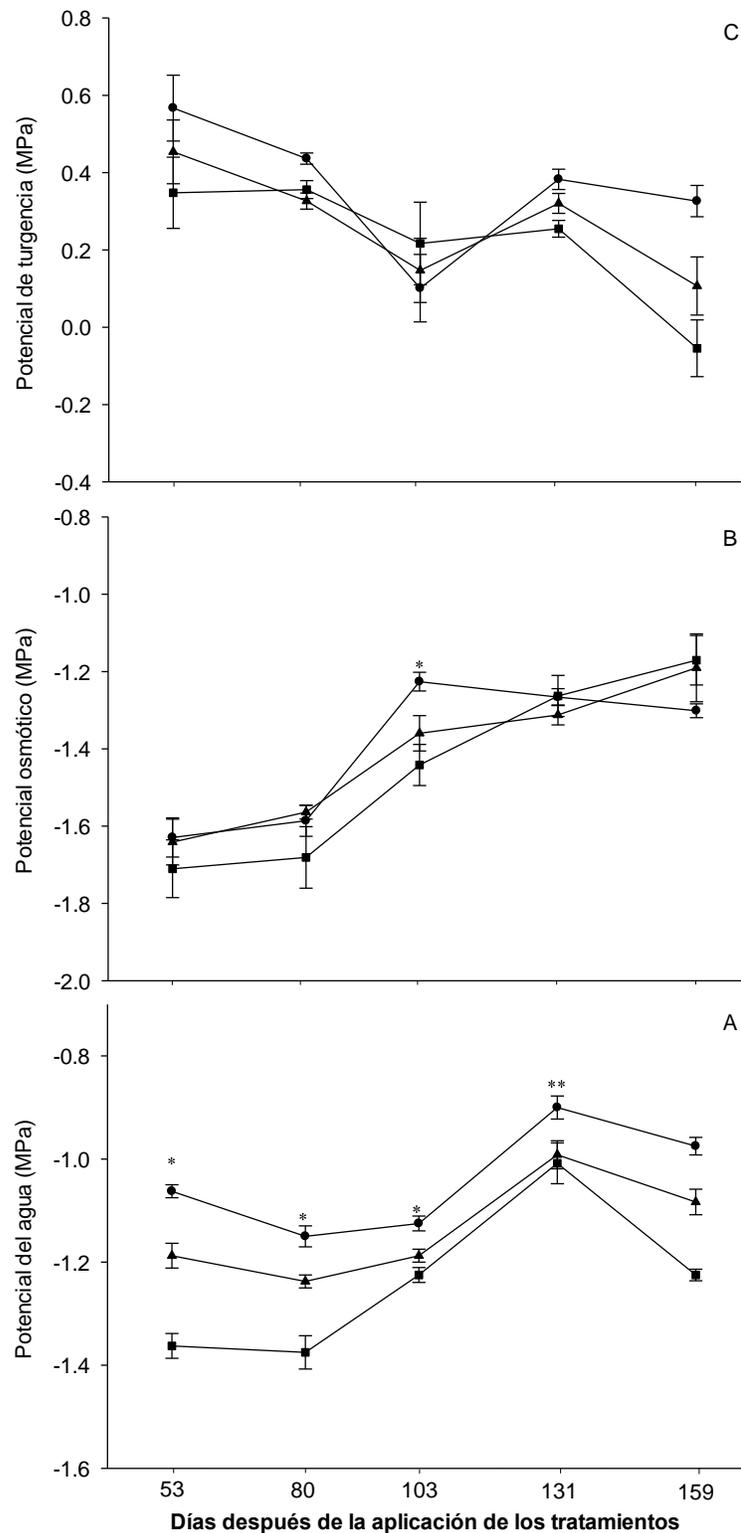


Figura 2. Potencial de agua (A), osmótico (B) y turgencia (C) de la hoja de *Carica papaya* L. en diferentes humedades del sustrato: testigo (●), aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt)), RD-59 (▲), aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt) y RD-66 (■), aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt). Los puntos son el promedio de seis repeticiones \pm el error estándar (n= 6).

Tabla 2. Potencial de agua, osmótico y de turgencia promedio durante 207 días en *C. papaya* L. en diferentes humedades del sustrato: testigo, aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt), RD-59, aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt). RD-66, aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del

Tratamientos	Potencial de agua MPa	Potencial osmótico MPa	Potencial de turgencia MPa	Prolina nmoles g ⁻¹ de peso seco
Testigo	-1.04 ± 0.08 b	-1.40 ± 0.18 a	0.364 ± 0.19 a	445.8 ± 68 a
RD-59	-1.13 ± 0.07 ab	-1.41 ± 0.96 a	0.276 ± 0.23 a	518.3 ± 159 a
RD-66	-1.23 ± 0.13 a	-1.45 ± 0.12 a	0.216 ± 0.18 a	518.0 ± 57 a
P≤0.05	*	NS	NS	NS

NS= No significativo; *= Significativo a $\alpha \leq 0.05$ mediante Tukey. Los datos son el promedio ± el error estándar, n = 5.

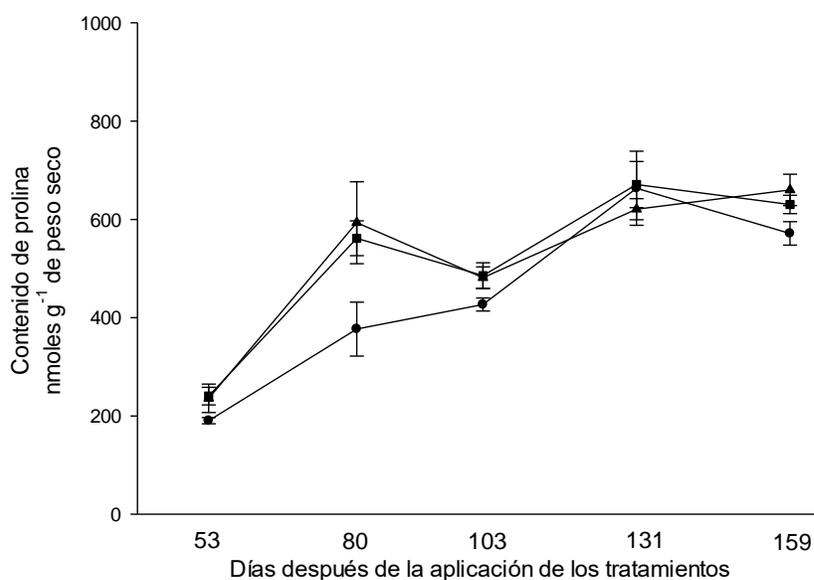


Figura 3. Contenido de prolina en hoja de *Carica papaya* L. en diferentes tratamientos de humedades del sustrato: testigo (●), aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt)), RD-59 (▲), aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt) y RD-66 (■), aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt). Los puntos son el promedio de seis repeticiones ± error estándar.

Tabla 3. Producción y productividad del agua en *C. papaya* L. en diferentes humedades del sustrato: Testigo, aplicación al sustrato de 1678 L de agua maceta⁻¹ (agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 días después del trasplante (ddt), RD-59, aplicación de 679.79 L de agua maceta⁻¹ (41 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt) y RD-66, aplicación de 573.6 L de agua maceta⁻¹ (34 % del agua máxima retenida en el sustrato de los 89 a los 296 ddt).

Tratamientos	Rendimiento (kg de fruto planta ⁻¹)	Productividad del agua (g de fruto L ⁻¹ de agua)	Huella hídrica (L de agua consumida por kg de fruto producido)
Testigo	29 ± 6.4 a	18 ± 0.03 c	54.8 a
RD-59	23 ± 2.2 a	34 ± 0.03 b	29.00 b
RD-66	28 ± 5.3 a	50 ± 0.09 a	20.13 c
P≤0.05	NS	***	**

NS= No significativo; *= Significativo a $\alpha \leq 0.05$ mediante Tukey. Los datos son el promedio ± el error estándar, n = 5.

La productividad del agua de riego se maximizó, el ahorro de agua en RD-59 y RD-66 fue de 88.8 y 177 %, respectivamente (Tabla 3). Carbonell-Barrachina *et al.* (2014), de Lima *et al.* (2016) y Santos *et al.* (2021) mencionaron que el riego deficitario puede reducir el gasto de agua en los cultivos, aseveración que fue comprobada en el presente estudio. Comparando con otros trabajos con riego de acuerdo con la demanda de evapotranspiración, en papaya se reportan de 357 a 909 L de agua para producir un kg de fruto (Manjunath *et al.*, 2022 y Bayabil *et al.*, 2020), en esta investigación, se encontró que para el testigo se necesitó 58 L de agua para producir un kg de fruto, para el tratamiento RD-59, 29 L y para RD-66, 20 L. Los resultados contrastantes se debieron a que los trabajos citados fueron realizados en condiciones de campo abierto donde la eficiencia del riego es baja debido a la pérdida de agua por una mayor evapotranspiración y eficiencia baja de los sistemas de riego (Santos *et al.*, 2021).

Por último, la diferencia estadística en el intercambio de gases no afectó de manera significativamente el rendimiento, esto podría ser que en entornos con escasez de agua, los cultivos pueden exhibir una mayor eficiencia en el uso del agua a pesar de tasas fotosintéticas reducidas, lo que les permite mantener niveles de rendimiento comparables a los de los testigos (Niun *et al.*, 2024; Stagno *et al.*, 2024).

CONCLUSIONES

El riego deficitario disminuyó la conductancia estomática, en consecuencia, la asimilación de CO₂ y la transpiración en comparación con el testigo. El potencial de agua de la hoja en el tratamiento con mayor déficit de riego disminuyó en comparación con el testigo y con el tratamiento con menor déficit de riego; sin embargo, en el potencial osmótico y de turgencia y contenido de prolina de la hoja no se observaron cambios por el riego deficitario. Aunque el riego deficitario disminuyó el rendimiento, incrementó la productividad del agua. En condiciones, donde el agua es una limitante, el riego deficitario es una alternativa para la producción de *Carica papaya* L.

Agradecimientos

Al CONACYT por la beca de maestría otorgada al primer autor (No. de beca 773223). Al Colegio de Postgraduados, al Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fruticultura, al Posgrado en Botánica y al personal del vivero “Valerio Trujano” del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero por el apoyo para el desarrollo del trabajo.

Funding: Funded by CP-Campus Montecillo.

Conflict of interests: Nothing to declare

Compliance with ethical standards: Do not apply

Data availability: Data is available with Carlos Trejo (catre@colpos.mx) upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **D. Trujillo-García**, Investigation, writing – original draft, formal analysis, **E. Uscanga-Mortera**-Methodology, supervision, writing –original draft, **M.A. Otero-Sánchez**- Supervision, validation, methodology, **A.E. Becerril-Román**, Validation, writing – review and editing, **D. Jaén-Contreras**-Validation, Writing –review a editing, **E. Canales-Sosa**, Resouces, validation., **C. Trejo** – Conceptualization, resources, methodology, writing-review and editing.

REFERENCES

- Adeoye, R.I., Olopade, E.T., Olayemi, I.O., Okaiyeto, K. and Akiibinu, M.O., 2024. Nutritional and therapeutic potentials of *Carica papaya* Linn. seed: A comprehensive review. *Plant Science Today*. <https://doi.org/10.14719/pst.2843>
- Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39, pp. 205–207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
- Bayabil, H.K., Crane, J. H., Migliaccio, K.W., Li, Y., Ballen, F. and Guzmán, S., 2020. Programación de Riego Basado en el Método de Evapotranspiración Para Papaya (*Carica papaya*) en Florida. *EDIS*, 2020(6). <https://doi.org/10.32473/edis-ae547-2020>
- Blaya-Ros, P.J., Blanco, V., Torres-Sánchez, R. and Domingo, R., 2021. Drought-Adaptive Mechanisms of Young Sweet Cherry Trees in Response to Withholding and Resuming Irrigation Cycles. *Agronomy*, 11, pp. 1-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091812>
- Burns, P., Saengmanee, P. and Doung-Ngern, U., 2023. Papaya: the versatile tropical fruit. En *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104624>
- Campostrini, E., Schaffer, B., Ramalho, J.D., González, J.C., Rodrigues, W.P., da Silva, J.R. and Lima, R.S., 2018. Environmental factors controlling carbon assimilation, growth, and yield of papaya (*Carica papaya* L.) under Water-Scarcity scenarios: In: I. F. García and V.H. Durán, eds. *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment*. Oxford, UK: Academic Press. pp. 481–505.

- Carbonell-Barrachina, N.A., Memmi, H., Noguera-Artiaga, L., Gijón-López, M.C., Ciapa, R. and Pérez-López, D., 2014. Quality attributes of pistachio nuts as affected by rootstock and deficit irrigation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, pp. 2866–2873. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7027>
- Carr, M.K.V., 2013. The water relations and irrigation requirements of papaya (*Carica papaya* L.): A review. *Experimental Agriculture*, 50, pp. 270–283. <https://doi.org/10.1017/s0014479713000380>
- De Lima, R.S.N., de Assis-Figueiredo, F.A.M.M., Martins, A.O., da Silva De Deus, B.C., Ferraz, T.M., de Menezes de Assis, M., Fernandez De Sousa, E., Gleen, D. M. and Campostrini, E., 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity, and water-use efficiency of papaya. *Scientia Horticulturae*, 183, pp. 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.005>
- Dolan, F., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., Reed, P. and Edmonds, J., 2021. Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications*, 12, pp.1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022. Valor de la producción. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (Consultado el 20 de Marzo de 2022).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (FAO) 2024. Food balances 2010-. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/FBS>. (Consultado el 02 de septiembre de 2024).
- Galindo, A., Collado-González, J., Griñan, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M., Girón, I., Rodríguez, P., Cruz, Z., Memmi, H., Carbonell-Barrachina, A., Hernández, F., Torrecillas, A., Moriana, A. and Pérez-López, D., 2018. Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural Water Management*, 202, pp. 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.015>
- Ghaffari, H., Tadayon, M.R., Bahador, M. and Razmjoo, J., 2021. Investigation of the proline role in controlling traits related to sugar and root yield of sugar beet under water deficit conditions. *Agricultural Water Management*, 243, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106448>
- Giménez, C., Gallardo, M. and Thompson, R., 2013. Plant–Water Relations. In: *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.05257-x>
- Igbadun, H.E., Mahoo, H.F., Tarimo, A.K., and Salim, B.A., 2006. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, 85(1-2), pp.141-150. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.04.003>
- Islam, A.T., Islam, A.S., Islam, G.T., Bala, S.K., Salehin, M., Choudhury, A.K., Dey, N.C., and Hossain, A., 2022. Adaptation strategies to increase water productivity of wheat under changing climate. *Agricultural Water Management*, 264, p.107499. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107499>
- Jones, H.G., 1980. Interaction and integration of adaptive responses to water stress: the implications of an unpredictable environment. In: N.C, Turner, P.J, Kramer. eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. New York: Wiley. pp. 353-365.
- Karanja, J.K., Aslam, M.M., Qian, Z., Yankey, R., Dood, I. C. and Weifeng, X., 2021. Abscisic Acid Mediates Drought-Enhanced Rhizosheath Formation in Tomato. *Frontiers in Plant Science*, 12, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.658787>
- Liao, Q., Ding R., Du, T., Kang, S., Tong, L. and Li, S., 2022. Stomatal conductance drives variations of yield and water use of maize under water and nitrogen stress. *Agricultural Water Management*, 268, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107651>
- Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y. and Yang, H., 2022. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future*, 10, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1029/2021ef002567>
- Luo, Y., Li, W., Huang, C., Yang, J., Jin, M., Chen, J., Pang, D., Chang, Y., Li, Y. and Wang, Z., 2021. Exogenous abscisic acid coordinating leaf senescence and transport of assimilates into wheat grains under drought stress by

- regulating hormones homeostasis. *The Crop Journal*, 9(4), pp. 901–914. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.08.012>
- Mahmood, T., Abdullah, M., Ahmar, S., Yasir, M., Iqbal, M. S., Yasir, M., Ur-Rehman, S., Ahmed, S., Rana, R. M., Ghafoor, A., Nawaz-Shah, M. K., Du, X. and Mora-Poblete, F., 2020. Incredible Role of Osmotic Adjustment in Grain Yield Sustainability under Water Scarcity Conditions in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 9, pp. 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants9091208>
- Manjunath, B., Upreti, K., Laxman, R., Radha, T., and Raghupathi, H., 2022. Partial root-zone drying irrigation for higher water use efficiency in papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Applied Horticulture*, 24(02). <https://doi.org/10.37855/jah.2022.v24i02.26>
- Manjunath, B., Laxman, R. H., Upreti, K. K. and Raghupathi, H. B., 2017. Partial root zone drying irrigation in papaya (*Carica papaya* L.) for enhanced water use efficiency under limited water situations. *Journal Horticultural Sciences*. 12. pp. 143-149. <https://krishi.icar.gov.in/jspui/bitstream/123456789/17601/1/DECEMBER%3d2017.pdf>
- Mellado-Vázquez, A., Volke-Haller, V., Tapia-Vargas, M. and Sánchez-García, P., 2005. Response of papaya to irrigation and N-P-K fertilization in a vertisol. *TERRA Latinoamericana*, 23, pp. 137–144. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311093004.pdf>
- Mirafuentes, H.F. and Santamaría, B.F., 2014. MSXJ, híbrido de papaya sin carpeloidia para el sureste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, pp. 1297-1301.
- Niu, Y., Zhang, K., Khan, K.S., Fudjoe, S.K., Li, L., Wang, L., and Luo, Z., 2024. Deficit Irrigation as an Effective Way to Increase Potato Water Use Efficiency in Northern China: A Meta-Analysis. *Agronomy*, 14(7), 1533. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071533>
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K. and Tran, L.P., 2014. Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, pp. 1-8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>
- Oztürk, M., Turkyilmaz-Unal B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A. and Hasanuzzama, M., 2020. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*. 172, pp. 1321–1335. <https://doi.org/10.1111/plp.13297>
- Raja, V., Qadir, S.U., Alyemini, M.N. and Ahmad, P., 2020. Impact of drought and heat stress individually and in combination on physio-biochemical parameters, antioxidant responses, and gene expression in *Solanum lycopersicum*. 3 *Biotech*, 10, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02206-4>
- Sadigov, R., 2022. Rapid growth of the world population and its socioeconomic results. *The Scientific World Journal*, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/8110229>
- Santos, D.L., Coelho, E.F., Cunha, F.F.D., Donato, S.L.R., Bernado, W.D.P., Rodriguez, W.P. and Campostrini, E., 2021. Partial root-zone drying in field-grown papaya: Gas exchange, yield, and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 243, pp.1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106421>
- Scalisi, A., O'Connell, M. G., Stefanelli, D. and lo Bianco, R., 2019. Fruit and Leaf Sensing for Continuous Detection of Nectarine Water Status. *Frontiers in Plant Science*, 10, pp. 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00805>
- Schmeier, S. (20 de marzo de 2022). [Entrevistado por N. M. Neil King]. <https://p.dw.com/p/492Hb>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2022. Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Consultado el 20 de Mayo 2022).
- Shiade, S.R.G., Zand-Silakhoor, A., Fathi, A., Rahimi, R., Minkina, T., Rajput, V.D., Zulfiqar, U. and Chaudhary, T., 2024. Plant Metabolites and Signaling Pathways in Response to Biotic and Abiotic Stresses: Exploring Bio stimulant Applications. *Plant Stress*, 12, p.100454. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100454>
- Stagno, F., Brambilla, M., Rocuzzo, G. and Assirelli, A., 2024. Water Use Efficiency in a Deficit-Irrigated Orange Orchard. *Horticulturae*, 10(5), p.498. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050498>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022. Climate change widespread, rapid, and intensifying. Ginebra.

- <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/> (Consultado el 15 de junio de 2022).
- The World Bank. Water in Agriculture. The World Bank Group. Washington D. C. <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture#1> (Consultado el 15 Marzo de 2022).
- Wu, P., Wang, Y., Shao, J., Yu, H., Zhao, Z., Li, L., Gao, P., Li, Y., Liu, S., Gao, C., Guan, X., Wen, P., and Wang, T., 2024. Enhancing productivity while reducing water footprint and groundwater depletion: Optimizing irrigation strategies in a wheat-soybean planting system. *Field Crops Research*, 309, p.09331. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109331>
- Zapata-García, S., Temnani, A., Berrios, P., Pérez-López, R.D., Monllor, C., and Pérez-Pastor, A. 2024. Mejora de la productividad del agua de riego mediante déficit hídrico y bioestimulación en pimiento en condiciones de invernadero. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 22334.