

MONITOREO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN SOJA BAJO RIEGO DEFICITARIO MEDIANTE TERMOMETRÍA INFRARROJA

Andrés Di Lorenzi¹, Raquel Hayashi², Lucía Puppo²

RESUMEN: El riego deficitario optimiza el uso del agua en soja, pero requiere herramientas precisas para monitorear su impacto. La termometría infrarroja permite evaluar la respuesta del cultivo al estrés hídrico y su aplicación en la programación del riego. En el Centro Regional Sur (Facultad de Agronomía), se evaluó un ensayo de riego deficitario controlado en soja con cuatro tratamientos: 1) riego al 100% de la ETc durante todo el ciclo, 2) 50% de la ETc en fase vegetativa y 100% desde R4 a R6inclusive, 3) 80% de la ETc hasta R6inclusive, y 4) secano (solo lluvia). Se empleó un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones, aplicando riego localizado con una lámina bruta de 16 mm. Se midió la humedad del suelo con sonda FDR y la temperatura del cultivo con una cámara térmica HTI de alta resolución, al mediodía. También se registraron el potencial xilemático y la conductancia estomática. Los datos preliminares indicaron diferencias en la respuesta térmica entre tratamientos, con alta correlación entre la temperatura foliar y el estado hídrico del suelo ($R^2 = 0,87$), el potencial xilemático ($R^2 = 0,75$) y la conductancia estomática ($R^2 = 0,94$). Aunque se requieren más años de evaluación, los índices DANS, DACT y CWSI mostraron buen desempeño, destacando el potencial de la termometría infrarroja para la gestión del riego en soja en clima templado.

PALABRAS CLAVE: *Glycinemax*, teledetección, fisiología del estrés, eficiencia hídrica, gestión del riego

¹Ingeniero Agrónomo, Magíster en Ciencias Agrarias, Doctorando en Ciencias Agrarias, Unidad de Hidrología, Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay adilorenzi@fagro.edu.uy

²Doctora en Ciencias Agrarias, Unidad de Hidrología, Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

MONITORING WATER STRESS IN SOYBEAN UNDER DEFICIT IRRIGATION USING INFRARED THERMOMETRY

Andrés Di Lorenzi¹, Raquel Hayashi², Lucía Puppo²

ABSTRACT: Deficit irrigation optimizes water use in soybean but requires precise tools to monitor its impact. Infrared thermometry allows the assessment of crop response to water stress and its application in irrigation scheduling. A controlled deficit irrigation trial was conducted at the Centro Regional Sur (Faculty of Agronomy) with four treatments: (1) 100% of ET_c throughout the crop cycle, (2) 50% of ET_c during the vegetative stage and 100% from R4 to R6, (3) 80% of ET_c until R6, and (4) rainfed (no irrigation). A randomized block design with four replications was used, applying localized irrigation with a gross water depth of 16 mm. Soil moisture was measured using an FDR probe, and crop temperature was recorded at midday with a high-resolution HTI thermal camera. Additionally, xylem potential and stomatal conductance were measured. Preliminary data indicate differences in the thermal response among treatments, showing a high correlation between leaf temperature and soil water status ($R^2 = 0.87$), xylem potential ($R^2 = 0.75$), and stomatal conductance ($R^2 = 0.94$). Although further evaluation is needed, the DANS, DACT, and CWSI indices performed well, highlighting the potential of infrared thermometry for irrigation management in soybean under temperate climate conditions.

PALABRAS CLAVE: *Glycine max*, remote sensing, stress physiology, water use efficiency, irrigation management

INTRODUCCIÓN

En Uruguay, la soja es el principal cultivo de verano tanto en producción como en área sembrada (MGAP-DIEA, 2024). Mayormente cultivada en secano, presenta variaciones significativas en rendimiento y un alto riesgo de pérdida total debido a sequías. La implementación de riego suplementario se presenta como una estrategia clave para mejorar la productividad y estabilizar los rendimientos. En este sentido, el desarrollo de técnicas más eficientes para programar el riego es fundamental, ya que

permite optimizar la producción y al mismo tiempo preservar los recursos hídricos. Una de las formas de programar el riego es mediante el monitoreo del estado hídrico del cultivo, lo que facilita la toma de decisiones sobre el momento más adecuado para aplicar el riego. Los métodos tradicionales, como la porometría, el flujo de savia y la medición del potencial hídrico, son invasivos y poco representativos a escala de campo. A diferencia de estos métodos, la medición de la temperatura del cultivo mediante radiómetros infrarrojos permite un monitoreo continuo y remoto. Aunque su uso en Uruguay aún es incipiente (Otero y García, 2024), a nivel global hay diversas investigaciones sobre su aplicación para mejorar la eficiencia del riego (Jackson et al., 1981; Irmak et al., 2000; Taghvaeian et al., 2014; DeJonge et al., 2015; Zhang et al., 2023a).

Para estimar el estrés hídrico, Jackson et al. (1981) e Idso (1982) propusieron el índice de estrés hídrico de cultivos (CWSI), basado en la diferencia entre la temperatura de un dosel no transpirante (T_{np}) y otro bien regado (T_p), expresado como: $CWSI = (T_{hoja} - T_p) / (T_{np} - T_p)$. Pramanik et al. (2017) enfatizaron la importancia de monitorear en sitio y de manera continua variables micrometeorológicas, como el déficit de presión de vapor (DPV) y la temperatura del aire, para calcular los límites del CWSI. En Colorado, Taghvaeian et al. (2014) evaluaron el CWSI y el índice DANS (diferencia de temperatura entre un cultivo estresado y uno bien regado) en girasol, concluyendo que el DANS, aunque más simple, es una herramienta útil programar el riego. Resultados similares en maíz fueron reportados por DeJonge et al. (2015), quienes además propusieron el índice DACT (grados por encima de una temperatura crítica), que cuantifica la diferencia de temperatura respecto a un umbral crítico mediante la siguiente ecuación: $DACT = \max[0, T_{cultivo} - T_{critica}]$. El estado hídrico del suelo también puede utilizarse para la programación del riego. Sin embargo, aunque el estrés hídrico del cultivo y el déficit de agua en el suelo están relacionados, su interacción es compleja y debe analizarse con detalle (DeJonge et al., 2015). Si bien estos índices han sido ampliamente evaluados en regiones áridas y semiáridas, su aplicación en climas templados sigue siendo limitada (Lena et al., 2020; Candogan et al., 2013; Bockhold et al., 2011; Kar y Kumar, 2010). Por ello, este estudio evalúa la respuesta térmica y fisiológica del cultivo de soja bajo distintos niveles de riego deficitario, analizando la relación entre la temperatura foliar, el estado hídrico del suelo y la fisiología del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía, ubicado en Progreso, Canelones, Uruguay (34°37' S y 56°13' O). De acuerdo con la clasificación de Köppen y Geiger, el clima corresponde a un templado mesotérmico (Cfa), caracterizado por la ausencia de estación seca y veranos calurosos. La precipitación anual promedio es de 1200 mm, con una alta variabilidad interanual e irregularidad estacional. Durante el período estival, la temperatura media oscila entre 18 y 23 °C, con una radiación diaria de 200-250 Wm⁻² y una humedad relativa del 72 %. El suelo en el área experimental fue un BrunosolEútrico típico Lac., clasificado como Argiudol típico (USDA). Las propiedades hídricas del suelo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características físicas e hídricas de suelo.

Profundidad (cm)	Capacidad de campo (vol%)	Punto de marchitez permanente (vol%)	Densidad aparente (gr cm ⁻³)	Agua disponible (mm horizonte ⁻¹)
0-19	44,9	27,4	1,15	33
20-36	45,6	27,7	1,2	28,6
37-80	43,2	25,9	1,2	74,1

Se establecieron cuatro tratamientos de riego: el primero consistió en la aplicación del 100 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) durante todo el ciclo; el segundo incluyó un riego al 50 % de la ETc durante la etapa vegetativa y hasta R4 inclusive, incrementándose al 100 % desde la floración (R4) hasta R6 inclusive; el tercero se basó en un riego al 80 % de la ETc a lo largo de todo el ciclo, finalizando en el llenado de grano (R6inclusive); finalmente, el tratamiento de secano solo recibió agua de lluvia. El diseño experimental utilizado fue en bloques completos al azar (DBCA), con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Las parcelas fueron de 12 x 6 m, con 12 filas separadas por 0,35 m. El experimento se desarrolló durante la campaña 2024-2025.

Se sembró una variedad GM IV de alto potencial: Don Mario 60i62RSF de Barraca Erro, mediante siembra directa, con una densidad objetivo de 300.000 plantas ha⁻¹. Previo a la siembra, las semillas fueron inoculadas con cepas de *Bradyrhizobium elkanii* más Bioprotector ADD-IT BLUE (producto comercial, Biopack LIKUIQ, de Lage y Cia. SA). Se aplicaron herbicidas pre y postsiembra y fertilización en siembra según análisis de suelo. El riego se realizó con goteros de 4 L h⁻¹ espaciados a 1,0 m, aplicando láminas brutas de 16 mm (Morales et al., 2022). El momento de riego se

determinó mediante un balance hídrico diario (BHS, Allen et al., 1998). Se utilizaron datos climáticos de la estación meteorológica HOBO RX3000 (OnsetComputerCorporation, Massachusetts, EE.UU.) instalada en el sitio experimental. La humedad del suelo se midió de 2 a 3 veces por semana con una sonda de capacitancia portátil (FDR, Delta T Devices, PR2), calibrada previamente, con el objetivo de ajustar el BHS si era necesario.

Se calcularon cuatro indicadores térmicos: 1) índice de estrés hídrico (CWSI) (Jackson et al., 1981; Idso, 1982); 2) diferencia entre la temperatura del dosel y la temperatura del aire (Dif Tc-Ta) (DeJonge et al., 2015; Jones, H.G., 2018); 3) grados sobre canopia sin estrés (DANS) (Taghvaeian et al., 2014); y 4) grados sobre el umbral de canopia (DACT) (DeJonge et al., 2015). En este estudio se utilizará un valor umbral crítico de 28°C tal como utilizaron Bockhold et al. (2011) y Morales-Santos y Nolz, (2023) en climas húmedos para el cultivo de soja. Para los cálculos se utilizaron valores de temperatura media del aire y foliar en días con radiación solar superior a 700 Wm⁻² similar a lo propuesto por DeJonge et al. (2015), eliminando interferencias de la nubosidad. Se utilizó una cámara térmica HT-19 (HTI-Xintai, China) de alta resolución y precisión para medir la temperatura en cada parcela al mediodía. Se capturaron dos imágenes por parcela a 0,6 m sobre la canopia y en ángulo oblicuo (45°), en días despejados (radiación > 700 W m²) entre las 12:00 y 15:00 h (Irmak et al., 2000; Taghvaeian et al., 2012, 2014). Las imágenes se procesaron con IRImageTools. Se seleccionaron 20 hojas por imagen evitando la inclusión de otros órganos o suelo, se calculó la media y desvío por parcela. Se midió el potencial xilemático con una cámara de presión (Scholander) y la conductancia estomática con un porómetro (SC-1, METER Group, Inc., Pullman, WA, EE.UU.), en 2-3 hojas por parcela completamente desarrolladas a media altura, entre las 12:30 y las 14:30 h.

Se realizaron análisis de regresión para evaluar la relación entre la conductancia estomática, la temperatura foliar, el potencial xilemático y el porcentaje de agua disponible en el suelo. Se calcularon los coeficientes de determinación (R²) para determinar la bondad de ajuste de los modelos de regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura media del aire y la ETo total de la temporada 2024-2025 presentaron mínimas diferencias en comparación con los datos meteorológicos promedio de largo plazo (1995-2025) (datos no presentados, INIA GRASS, 2025). Sin embargo, las precipitaciones en enero y febrero fueron un 50 % inferiores al promedio histórico, mientras que en noviembre y diciembre se mantuvieron dentro de los valores habituales.

La Figura 1 muestra la evolución del agotamiento de la humedad del suelo a 0,70 m de profundidad en seco y 0,50 m en los tratamientos con riego, indicando los momentos de aplicación de agua y los eventos de precipitación.

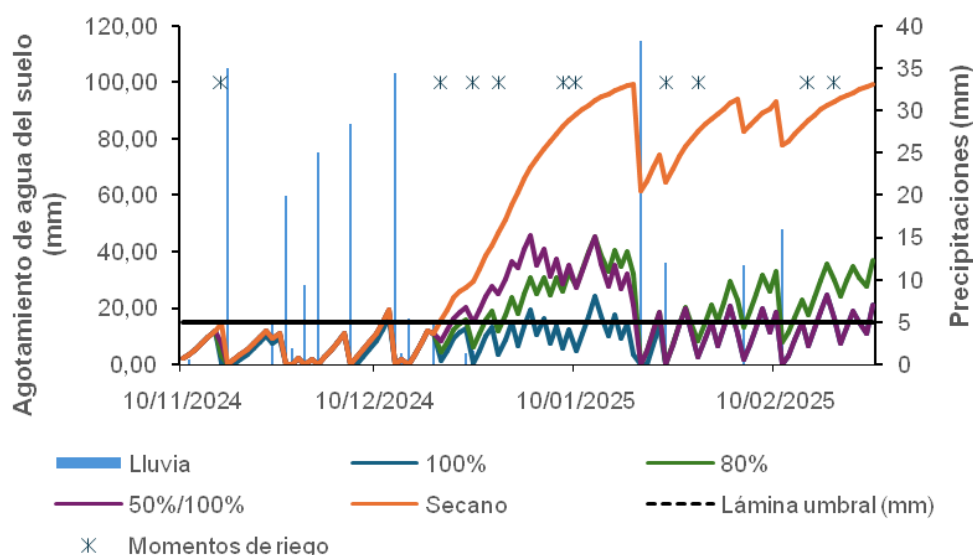


Figura 1. Evolución del agotamiento de la humedad del suelo a 0,70 m de profundidad (secano) y 0,50 m de profundidad (T-100% y T-80% y T-50%/100%), riego aplicado y precipitaciones durante el periodo la temporada 2024-2025.

Durante noviembre y diciembre, las precipitaciones fueron frecuentes, con eventos de 20 y 35 mm (Figura 1). En este período, solo se realizó un riego, lo que generó diferencias mínimas en el contenido de agua del suelo entre los tratamientos. En enero, con la interrupción de las lluvias, el contenido hídrico del suelo en el tratamiento de secano disminuyó notablemente, alcanzando valores mucho más bajos que en los tratamientos con riego. A partir de finales de diciembre, comenzaron a evidenciarse diferencias en el contenido de agua del suelo entre los tratamientos irrigados. En el tratamiento con reposición del 100 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) (curva azul), el déficit hídrico acumulado se mantuvo entre 16 y 20 mm. En cambio, en el tratamiento con reposición del 50 % de la ETc en las primeras etapas y del 100 % en el

período crítico (curva violeta), el déficit acumulado llegó a 46 mm en enero. Con el inicio del período crítico, este tratamiento comenzó a recibir la misma cantidad de agua que el de 100 % ETC, y a principios de febrero, el déficit acumulado en ambos tratamientos se equiparó.

Los resultados evidencian una interrelación clara entre la temperatura foliar, la conductancia estomática, el potencial xilemático y el contenido de agua en el suelo en un cultivo de soja en clima templado en Uruguay (Figuras 2 y 3). En primer lugar, la relación inversa entre temperatura foliar y conductancia estomática (Figura 2a) indica que, a mayor temperatura foliar, la conductancia disminuye significativamente ($R^2 = 0,9375$). Este patrón es característico de la respuesta de la soja al estrés hídrico, en el que el cierre estomático reduce la transpiración y conserva el agua en los tejidos vegetales (Jones, 1999; Sadok & Sinclair, 2009). Los valores elevados de g_s en el cultivo bajo riego concuerdan con lo reportado por Zhang et al. (2023b) Toro et al. (2019) y Otero y García (2024). Por otro lado, la correlación positiva entre conductancia estomática y porcentaje de agua en el suelo (Figura 2b, $R^2 = 0,801$) sugiere que la apertura estomática depende en gran medida de la disponibilidad hídrica del suelo.

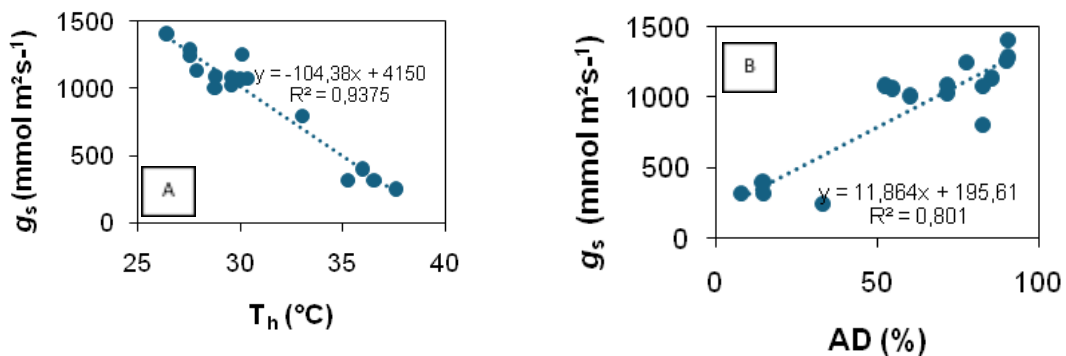


Figura 2. (a) Relación entre la conductancia estomática (g_s) y la temperatura foliar (T_h); (b) relación entre la conductancia estomática (g_s) y el porcentaje de agua disponible en el suelo a 0,50 m (AD%).

Asimismo, la relación negativa entre temperatura foliar y agua disponible en el suelo (Figura 3a, $R^2 = 0,8679$) confirma que el estrés hídrico se refleja en un aumento de la temperatura del dosel. Este hallazgo respalda el uso de la temperatura foliar como indicador confiable del estado hídrico, especialmente en sistemas de monitoreo mediante sensores térmicos (Zhang et al., 2023a; Taghvaeian et al., 2014; Idso et al., 1981). Además, se observa que cuando el contenido de agua desciende por debajo del 50 %, la temperatura foliar aumenta rápidamente (Figura 3a); sin embargo, en esta temporada se registraron pocos datos por debajo de este umbral, por lo que se requiere

evaluar esta relación con tratamientos de mayor estrés. Finalmente, la relación negativa entre potencial xilemático y la temperatura foliar (Figura 3b, $R^2 = 0,7497$) refuerza la hipótesis de que a mayor temperatura del dosel, mayor es el déficit hídrico en la planta. Esta tendencia sugiere que la temperatura de la canopia y los índices térmicos que derivan de ella y que analizaremos a continuación, son un buen indicador para cuantificar el estrés hídrico (DeJonge et al., 2015). Estos autores encontraron resultados similares en el cultivo de girasol bajo clima árido.

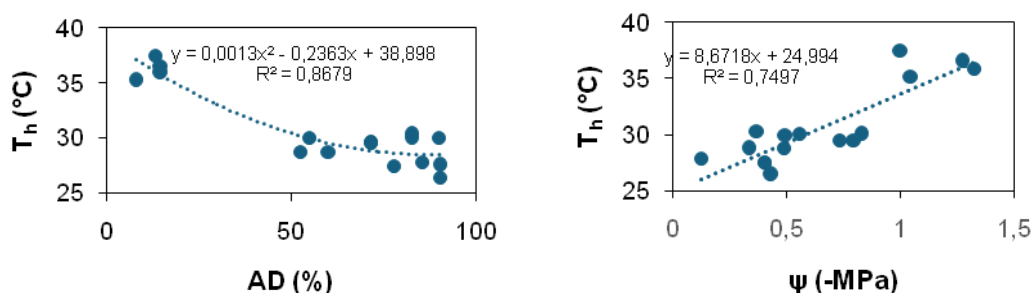


Figura 3.(a) Relación entre la temperatura foliar y el porcentaje de agua disponible en el suelo (0,50 m); (b) relación entre la temperatura foliar y el potencial xilemático (ψ , -MPa) al medio día (13:00-15:00 h).

Los índices térmicos analizados (Dif $T_c - T_a$, DANS, DACT y CWSI) reflejaron claramente el régimen hídrico de los tratamientos discriminándolos de manera efectiva (Figura 6a-d). Si bien en climas áridos y semiáridos se ha reportado que el período óptimo para la medición del CWSI es entre las 12:00 y las 13:00 h, momento en el que alcanza su valor máximo (Irmak et al., 2000; Taghvaeian et al., 2012), en este estudio se utilizaron valores promedio de temperatura del aire y del cultivo entre las 14:00 y 15:00 h, período en el que se evidenciaron mayores diferencias térmicas. En los tratamientos con riego, la transpiración permitió que el dosel se mantuviera más fresco que el aire circundante, alcanzando diferencias térmicas negativas de hasta -5°C en el tratamiento con reposición del 100 % de la E_{Tc} , lo que indica un estado óptimo de hidratación del cultivo. En contraste, en secano, donde la transpiración se redujo por la falta de agua, la temperatura del dosel superó la del aire, con valores positivos de Dif $T_c - T_a$ de hasta 5°C (Figura 6a). En enero, tras el cese de las precipitaciones frecuentes registradas en diciembre (Figura 1), la Dif $T_c - T_a$ mostró un aumento considerable en el cultivo en secano (Figura 6a). Este mismo patrón se reflejó en los índices térmicos DANS, DACT y CWSI (Figura 6b-d), lo que confirma que el estrés hídrico se intensificó a medida que avanzó el ciclo del cultivo. En particular, el tratamiento en secano alcanzó valores máximos de DANS y DACT cercanos a 10, y de CWSI superiores a 1,0, indicando un estado crítico de déficit hídrico. En las últimas tres fechas

evaluadas, se observa claramente cómo el tratamiento 50%/100% ET_c, al comenzar a regarse con el 100% ET_c (período crítico), se igualó al tratamiento 100% ET_c en todos los índices térmicos. Esto sugiere que el riego aplicado fue suficiente para restablecer el balance hídrico del cultivo y mitigar el estrés hídrico.

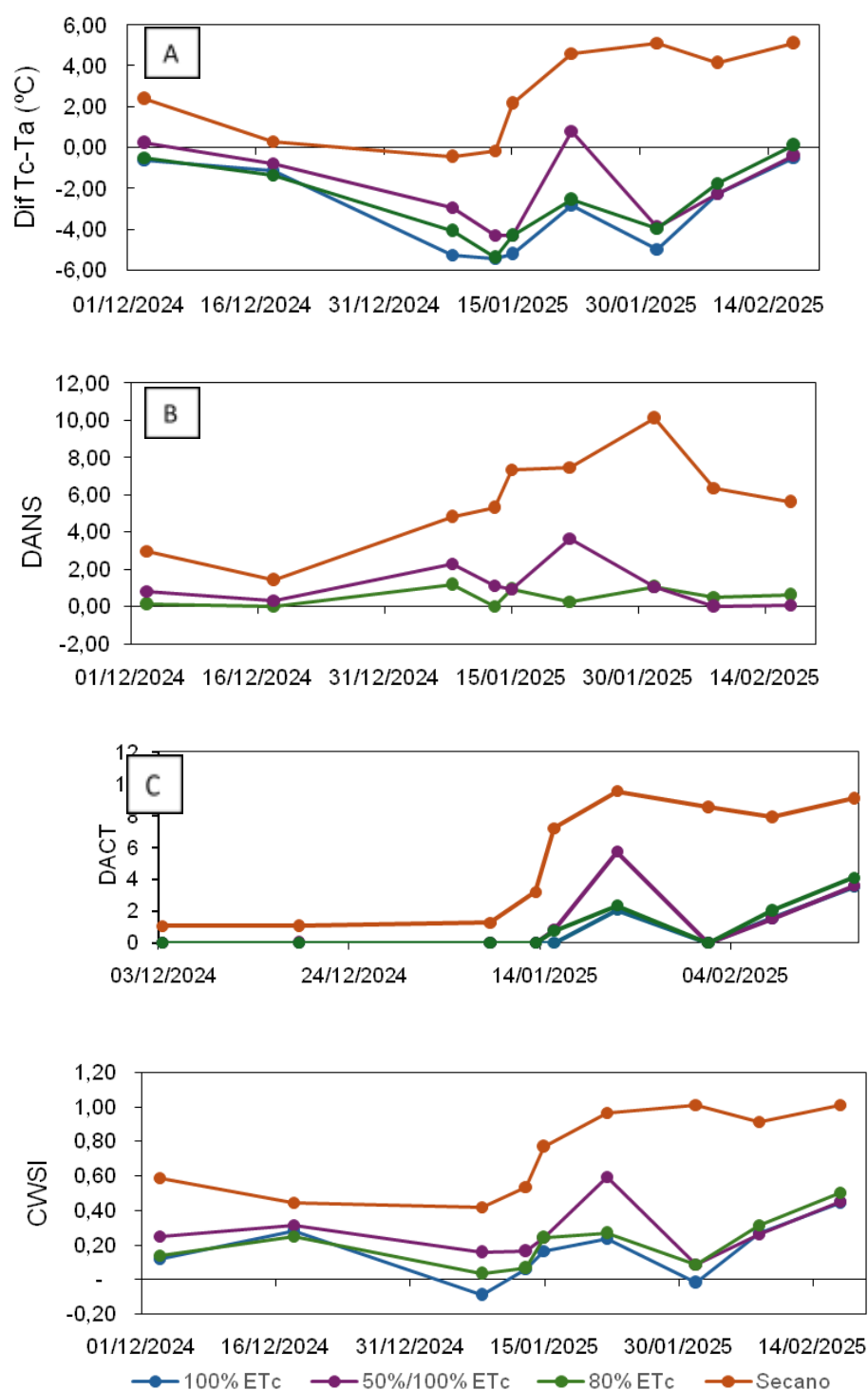


Figura 6. Evolución de:(a) la diferencia de temperatura entre la canopia y el aire (Dif Tc-Ta), (b) los grados por encima de un cultivo sin estrés hídrico (DANS), (c) los grados por encima de un umbral (28°C) (DACT), (d) el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), durante el ciclo 2024-2025.

Este resultado destaca la sensibilidad de los índices térmicos para detectar cambios en el estado hídrico del cultivo en respuesta a la disponibilidad de agua en el suelo, en concordancia con los patrones analizados previamente en las Figuras 2 a 5 y lo encontrado por Morales-Santos y Nolz (2023), DeJonge et al. (2015) y Taghvaeian et al. (2012). Algunos autores destacan que el CWSI puede presentar dificultades prácticas debido a su complejidad de cálculo y calibración (Kacira et al., 2002), por lo que índices como DANS, DACT, y $Dif T_c - T_a$ podrían representar opciones más prácticas y accesibles para productores y técnicos.

CONCLUSIONES

Los índices térmicos permitieron diferenciar claramente entre el cultivo bajo riego y en secano. En este estudio, el índice DANS mostró un desempeño similar al CWSI, pero con menores requerimientos de cálculo, lo que lo convierte en una opción más práctica. En cambio, el índice DACT presentó ciertas limitaciones para discriminar entre los tratamientos con riego, lo que sugiere la necesidad de incluir un tratamiento con estrés hídrico moderado para evaluar mejor su comportamiento en climas templados.

Además, la alta correlación entre los indicadores del estado hídrico del suelo y de la planta con la temperatura foliar indica que la temperatura del dosel y los índices térmicos derivados de ella son herramientas confiables para cuantificar el estrés hídrico en climas templados. No obstante, para mejorar su precisión, se recomienda evaluarlos a lo largo de varias temporadas, utilizando sensores térmicos infrarrojos con mediciones continuas. Esto permitiría analizar un rango más amplio de condiciones ambientales, en especial en lo relativo al déficit de presión de vapor y al contenido de agua en el suelo.

REFEERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOCKHOLD, D. L.; THOMPSON, A. L.; SUDDUTH, K. A.; HENGGELE, J. C. 2011. Irrigation scheduling based on crop canopy temperature for humid environments. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 54, 2021–2028. <https://doi.org/10.13031/2013.40654>.

- DEJONGE, K. C.; TAGHVAEIAN, S.; TROUT, T. J.; COMAS, L. H. 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agricultural Water Management**, 156, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.023>.
- GONZÁLEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P.; BERNI, J. A.; SUÁREZ, L.; GOLDHAMER, D.; FERERES, E. 2012. Almond tree canopy temperature reveals intra-canopy variability in water stress. **Plant and Soil**, 357(1-2), 237-252. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1157-9>.
- IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, 24, 45-55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7).
- IRMAK, S.; HAMAN, D. Z.; BASTUG, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, 92(6), 1227.
- JACKSON, R. D.; IDSO, S.; REGINATO, R.; PINTER, P. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, 17.
- JONES, H. G. 1999. Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. **Plant, Cell & Environment**, 22(9), 1043-1055. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00468.x>.
- JONES, H. G. 2018. Thermal imaging and infrared sensing in plant ecophysiology. **Advances in Plant Ecophysiology Techniques**, 135-151.
- KACIRA, M.; LING, P. P.; SHORT, T. H. 2002. Establishing crop water stress index (CWSI) threshold values for early, non-contact detection of plant water stress. *Transactions of the ASAE*, 45(3), 775–780.
- KAR, G.; KUMAR, A. 2010. Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. **Irrigation Science**, 28, 211–220.
- LENA, B. P.; ORTIZ, B. V.; JIMÉNEZ-LÓPEZ, A. F.; SANZ-SÁEZ, Á.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; DURSTOCK, M. K.; PATE, G. 2020. Evaluation of infrared canopy temperature data in relation to soil water-based irrigation scheduling in a humid subtropical climate. **Transactions of the ASABE**, 65, 1217–1231.
- MGAP-DIEA. 2024. Encuesta Agrícola “Invierno 2024”. Montevideo, Uruguay. 4 p.

MORALES-SANTOS, A.; NOLZ, R. 2023. Assessment of canopy temperature-based water stress indices for irrigated and rainfed soybeans under subhumid conditions. **Agricultural Water Management**, 279, 108214.

OTERO, A.; GARCÍA, C. 2024. Simposio sobre riego: **Sensoramiento remoto y manejo eficiente del agua en los sistemas productivos agrícolas**. 6 y 7 de marzo de 2024. INIA La Estanzuela. Colonia, Uruguay.

PRAMANIK, M.; GARG, N. K.; TRIPATHI, S. K.; SINGH, R.; RANJAN, R. 2017. A new approach of canopy temperature-based irrigation scheduling of wheat in humid subtropical climate of India. **Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B Biological Sciences**, 87, 1261–1269.

SADOK, W.; SINCLAIR, T. R. 2009. Genetic variability in soybean canopy temperature: Differential response to water deficit. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 195(4), 205-213. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00364.x>.

TAGHVAEIAN, S.; CHÁVEZ, J. L.; HANSEN, N. C. 2012. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado. **Remote Sensing**, 4(11), 3619-3637.

TAGHVAEIAN, S.; COMAS, L. H.; DEJONGE, K. C.; TROUT, T. J. 2014. Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. **Agricultural Water Management**, 144, 69–80.

TORO, G.; FLEXAS, J.; ESCALONA, J. M. 2019. Contrasting leaf porometer and infra-red gas analyser methodologies: An old paradigm about the stomatal conductance measurement. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, 31, 483–492.

ZHANG, J. 2023b. Estimating Crop Stomatal Conductance Through High-Throughput **Plant Phenotyping**.

ZHANG, L.; ZHANG, H.; ZHU, Q.; NIU, Y. 2023a. Further investigating the performance of crop water stress index for maize from baseline fluctuation, effects of environmental factors, and variation of critical value. **Agricultural Water Management**, 285, 108349.