

Relación entre índices de vegetación y biomasa forrajera en girasol en el Valle del Yaqui, México

Relationship between vegetation indices and forage biomass in sunflower in the Yaqui Valley, México

Elco Humberto García-Bolívar¹, Marisol Galicia-Juárez^{1*}, Vielka Jeanethe Castañeda-Bustos¹,
Xochilt Militza Ochoa-Espinoza², Juan Gabriel Brigido-Morales¹, Helio Adán García-Mendivil²

¹ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, Baja California, México, CP. 21705, Tel. (686)5230079 ext. 88. marisol.galicia.juarez@uabc.edu.mx

² Campo Experimental Norman E. Borlaug, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Cd. Obregón, Sonora, México. CP. 85000 Tel. 6444107600

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Biomasa forrajera;
rendimiento; girasol;
NDVI; NDRE.

La estimación tradicional del rendimiento en girasol forrajero (*Helianthus annuus* L., var. Girafor) es costosa y destructiva. Por ello, se evaluó la relación de los índices de vegetación (NDVI, NDRE) y valores SPAD con la biomasa en el Valle del Yaqui, Sonora, México, durante el ciclo otoño-invierno 2024-2025. Se emplearon sensores GreenSeeker® (Trimble) y SPAD-502Plus (Minolta®), y un CMOS montado en VANT DJI Mavic 3 Enterprise®, con muestreos a los 60 y 86 días después de la siembra (DDS). El NDVI obtenido con GreenSeeker a los 60 DDS mostró la correlación más alta y significativa con el rendimiento ($r = 0.465$; $p < 0.05$), el NDRE fue significativo a los 86 DDS ($r = 0.421$; $p < 0.05$). El SPAD no se asoció significativamente con el rendimiento. Se concluye que NDVI (en etapas tempranas) y NDRE (en etapas avanzadas) son útiles para predecir biomasa forrajera en girasol en zonas áridas.

Abstract

Keywords: Forage biomass; yield; sunflower; NDVI; NDRE.

Traditional estimation of forage sunflower (*Helianthus annuus* L., var. Girafor) yield is costly and destructive. Therefore, the relationship vegetation indices (NDVI, NDRE) and SPAD values with biomass was evaluated in the Valle del Yaqui, Sonora, Mexico, during the 2024-2025 fall-winter cycle. GreenSeeker® (Trimble), SPAD-502Plus® (Minolta) and CMOS sensor mounted on a DJI Mavic 3 Enterprise® UAV were used, with samplings at 60 and 86 days after sowing (DAS). NDVI obtained with GreenSeeker at 60 DAS showed the highest and most significant correlation with yield ($r = 0.465$; $p < 0.05$), while NDRE was significant at 86 DAS ($r = 0.421$; $p < 0.05$). SPAD values were not significantly associated with yield. It is concluded that NDVI (in early stages) and NDRE (in later stages) are useful for predicting forage sunflower biomass in arid regions.

Recibido: 27 de octubre de 2025

Aceptado: 20 de abril de 2026

Publicado: 23 de septiembre de 2026

Cómo citar: García-Bolívar, E. H.; Galicia-Juárez, M.; Castañeda-Bustos, V. J.; Ochoa-Espinoza, X. M.; Brigido-Morales, J. G.; & García-Mendivil, H. A. (2026). Relación entre índices de vegetación y biomasa forrajera en girasol en el Valle del Yaqui, México. *Acta Universitaria*, 36(NE-1), e4908. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2026.4908>

Introducción

El girasol (*Helianthus annuus* L.) se considera un cultivo de gran importancia debido a su adaptabilidad a climas áridos y semiáridos, donde se cultiva frecuentemente con riego suplementario (Hussain *et al.*, 2018; Puttha *et al.*, 2023). Su alta tolerancia al estrés hídrico se atribuye, en parte, a su sistema de raíces profundas que le permiten extraer agua que no es accesible para otros cultivos (Ren *et al.*, 2026; Sarazin *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021). Esta resiliencia lo convierte en un cultivo estratégico, no solo por la producción de aceite, sino por su capacidad para generar biomasa valiosa para la alimentación animal, lo cual contribuye a la sostenibilidad del sistema ganadero (Chiradza *et al.*, 2025; De Freitas *et al.*, 2016).

Para evaluar el rendimiento potencial del girasol es indispensable cuantificar la biomasa de manera precisa. Tradicionalmente se realizan estimaciones mediante métodos invasivos y destructivos que implican el corte de plantas a nivel del suelo y el secado en hornos hasta alcanzar un peso constante (Ang *et al.*, 2020; Mostafa *et al.*, 2021). Aunque estos métodos proporcionan mediciones directas, son lentos, costosos y poco prácticos para un monitoreo frecuente, sobre todo si se trata de grandes superficies de siembra (Debaeke *et al.*, 2023; Hernández *et al.*, 2024).

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado alternativas tecnológicas dentro de la agricultura de precisión, permitiendo la evaluación repetida sin comprometer la integridad vegetal ni la dinámica del crecimiento. Entre ellas, se incluye el uso de sensores ópticos para evaluar la biomasa de forma no destructiva, rápida y en tiempo real. Estos sensores se pueden encontrar en satélites, o bien, se pueden instalar en vehículos aéreos no tripulados. (Centorame *et al.*, 2024; De Souza *et al.*, 2021; Mba *et al.*, 2025).

El funcionamiento de estos sensores se basa en la captura de la reflectancia de ondas electromagnéticas de las superficies sin necesidad de contacto físico (Ang *et al.*, 2020; Xue & Su, 2017). Cada objeto posee una firma espectral única caracterizada por la forma en que refleja o emite energía en diferentes longitudes de onda. Así, una vegetación verde y saludable se distingue por una fuerte absorción en la región del rojo (R) y una alta reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) (Amankulova *et al.*, 2023; Centorame *et al.*, 2024; Mba *et al.*, 2025).

Para interpretar estos datos, se utilizan los índices de vegetación (IV), que son fórmulas matemáticas que combinan datos de reflectancia de dos o más longitudes de onda específicas (De Souza *et al.*, 2021; Xue & Su, 2017). Estas transformaciones espectrales permiten cuantificar de manera indirecta la superficie vegetal, resaltando su contribución con otros elementos del paisaje como el suelo, las rocas o sombras (Hernández *et al.*, 2024; Karaca *et al.*, 2025).

Entre los índices más utilizados se encuentra el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que se calcula como la proporción normalizada entre las bandas roja y NIR [$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$] (Boiarskii, 2019; Meloni *et al.*, 2024), siendo un indicador clave del vigor, la densidad y la salud de la biomasa (Aires *et al.*, 2025; Mba *et al.*, 2025). Sin embargo, debido a su tendencia a saturarse en etapas de alta densidad foliar, el índice de borde rojo de diferencia normalizada (NDRE) ha ganado relevancia por su mayor sensibilidad al contenido de clorofila en condiciones de alta biomasa, al utilizar la banda del borde rojo (Red Edge) en lugar del rojo [$NDRE = (NIR - Red\ Edge) / (NIR + Red\ Edge)$], lo que lo convierte en una herramienta prometedora para refinar estimaciones de rendimiento (Mba *et al.*, 2025; Sharifi & Felegari, 2023).

Dependiendo de su fuente de energía, los sensores se clasifican en: 1) pasivos, los cuales dependen de la luz solar y, por lo tanto, pueden ser afectados por la nubosidad o ángulo de elevación del sol; y 2) activos, aquellos que cuentan con su propia fuente de luz modulada y, por lo tanto, pueden operar independientemente de las condiciones de iluminación ambiental (De Souza *et al.*, 2021; Meloni *et al.*, 2024; Xue & Su, 2017).

Bajo esta clasificación, uno de los sensores activos que puede ser utilizado para el cálculo de NDVI es el sensor portátil GreenSeeker, que —al emitir su propia radiación modulada entre las bandas de rojo e infrarrojo cercano (NIR)— permite un muestreo rápido del dosel para evaluar la biomasa y el estado nutricional de cultivos sin depender de satélites o vuelos de drones (Bijay-Singh & Ali, 2020; Meloni *et al.*, 2024).

Además, de manera complementaria, el medidor de clorofila SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) también opera como un sensor activo no destructivo a nivel foliar y permite la estimación del contenido relativo de clorofila mediante la absorción de luz de ondas específicas (650 nm y 940 nm) (Bijay-Singh & Ali, 2020). Si bien no proporciona una visión integral del dosel, ofrece una medición fisiológica del estado fotosintético de la planta, la cual se ha correlacionado positivamente con el contenido de nitrógeno y la acumulación de biomasa en diversos cultivos (De Freitas *et al.*, 2016; Hnizil *et al.*, 2024; Uddling *et al.*, 2007).

La integración de sensores proximales (GreenSeeker y SPAD) con plataformas aéreas (VANT) permite una caracterización que combina la amplia cobertura espacial de las imágenes aéreas con la precisión fisiológica de las mediciones in situ, lo cual es particularmente valioso en ambientes áridos donde la heterogeneidad del suelo y el estrés hídrico pueden afectar la respuesta espectral y fisiológica de los cultivos.

En particular, la información sobre el uso de este tipo de tecnologías en girasol es limitada, pues no se han identificado estudios específicos que relacionen de forma integrada los índices NDVI, NDRE y mediciones SPAD con la biomasa forrajera en condiciones de estrés hídrico en zonas áridas. Por tanto, el presente estudio responde a la necesidad de implementar herramientas de agricultura de precisión para el manejo eficiente de cultivos forrajeros en regiones con limitaciones hídricas. Así, el objetivo de este estudio fue determinar la relación entre índices de vegetación (NDVI, NDRE) y contenido de clorofila (SPAD) con el rendimiento de biomasa forrajera en girasol (*Helianthus annuus* L.) en el Valle del Yaqui, Sonora, México.

Materiales y métodos

El experimento se realizó durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2024-2025 en el Campo Experimental Norman E. Borlaug (CENEB), ubicado en el Valle del Yaqui, Sonora, México (27° 22' 05" N, 109° 55' 52" O, 37 m. s. n. m.). El cultivo utilizado fue girasol forrajero (*Helianthus annuus* L., var. Girafor) en un suelo de textura franco-arcillosa y de gran profundidad.

La preparación del terreno incluyó un paso de arado, doble rastreo y nivelación con escropa, condiciones esenciales para garantizar una emergencia uniforme del cultivo. La siembra se realizó en seco, el 26 de noviembre de 2024 con una sembradora de precisión Monosem®. La fertilización de presiembra consistió en una dosis de 120-60-00 (N-P-K), equivalente a 50 kg N ha⁻¹ (urea al 46%) y 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ (fosfato monoamónico), destinada a cubrir las demandas nutricionales iniciales.

Las parcelas experimentales consistieron en cuatro surcos de 45 m de longitud y 0.80 m de separación, con tres repeticiones. Las mediciones se realizaron en los dos surcos centrales, con cinco repeticiones por variable. La unidad de muestreo fue de 8 m lineales $\times$ 0.8 m de ancho para NDVI y 4.5 m lineales $\times$ 0.8 m de ancho para NDRE. En el caso del SPAD, las lecturas se tomaron en la parte media de la cuarta hoja superior, a un costado de la nervadura central.

El monitoreo de los índices de vegetación y concentración de clorofila se realizó mediante tres métodos complementarios:

1. Sensor portátil GreenSeeker® (Trimble). Se realizaron mediciones manuales a lo largo del costado de los surcos, manteniendo una distancia aproximada de 1 m del follaje, a los 60 y 86 días después de la siembra (DDS). El sensor utiliza banda roja (~660 nm) e infrarrojo cercano (~780 nm), ambas de aproximadamente 25 nm.
2. Vehículo aéreo no tripulado (VANT). Se utilizó un VANT DJI Mavic 3 Enterprise® y el sensor multispectral del DJI Mavic 3 multispectral para calcular a partir de las bandas rojo (650 nm, 16 nm de ancho) e infrarrojo cercano (860 nm, 26 nm de ancho). El vuelo, programado en modo fotogramétrico automatizado con DJI Pilot 2 (misión en cuadrícula/waypoints), se realizó a 30 m de altura con un GSD de 0.861 cm/píxel, cubriendo toda la parcela sin intervención manual (Pix4D. 2025).
3. Medición directa mediante SPAD. Se utilizó un equipo portátil SPAD-502Plus (Minolta®). Para efectuar cada medición, la hoja se insertó cuidadosamente en el cabezal del instrumento y se cerró para registrar el valor correspondiente. Las lecturas se realizaron en la cuarta o quinta hoja contadas desde el ápice hacia la base de la planta (posición que corresponde a hojas fisiológicamente activas y representativas del estado general del cultivo). Se realizaron cinco lecturas independientes en hojas distintas, siguiendo el mismo protocolo en cada medición.

La captura de imágenes con el VANT y las lecturas con SPAD-502Plus (Minolta®) y GreenSeeker® (Trimble) se realizaron durante el periodo de máxima radiación solar, entre las 12:30 horas y las 14:00 horas, a los 60 DDS y 86 DDS, ya que esta condición favorece la expresión fotosintética de las plantas. Las imágenes se procesaron mediante el *software* Pix4Dfields 2.9, para generar tanto ortomosaicos como mapas de NDVI y NDRE, los cuales permitieron identificar y clasificar zonas de variabilidad espacial en cada etapa fenológica, reflejando el estado fisiológico actual, así como el potencial evolutivo del cultivo.

Para determinar la asociación entre los índices de vegetación y el rendimiento, se realizó un análisis de correlación de Pearson. Cuando la correlación resultó significativa, se realizó un análisis de regresión simple y se obtuvo la ecuación predictiva correspondiente. Las lecturas puntuales de los índices de vegetación y concentración de clorofila (GreenSeeker® [Trimble], SPAD-502Plus [Minolta®] y los valores integrados del VANT) fueron empleados para el análisis de correlación. Las imágenes fueron procesadas en Pix4Dfields 2.9, y se generó un ortomosaico multispectral georreferenciado. Los índices se obtuvieron delimitando parcelas sobre el ortomosaico: para NDVI, la unidad fue de 8 m $\times$ 0.8 m y para NDRE fue 4.5 m $\times$ 0.8 m, ambos a lo largo de los surcos y muestreados a los 60 DDS y 86 DDS. Se calcularon estadísticas zonales (promedio por parcela) que reflejaron el estado espectral del dosel vegetal en la fecha de vuelo. El análisis de datos se realizó con el *software* JMP versión 17.0.0. (SAS Institute Inc., 2023).

Resultados

Los coeficientes de correlación entre los índices de vegetación y el rendimiento fluctuaron entre -0.3884 a 0.4648 (Tabla 1). A los 60 DDS, únicamente el índice NDVI mostró correlaciones significativas ($p < 0.05$): 0.4648 con el GreenSeeker® (Trimble) y -0.3884 con el VANT. Por otra parte, a los 86 DDS, la única correlación significativa ($p < 0.05$) fue la del NDRE (0.4214).

Tabla 1. Coeficientes de correlación (r) entre rendimiento y diferentes índices de vegetación tomados a los 60 y 86 DDS.

IV	NDVI				SPAD		NDRE	
	Greenseeker		VANT					
	60	86	60	86	60	86	60	86
R	0.4648	0.2482	-0.3884	0.1999	0.2765	-0.1989	0.0997	0.4214
Valor p	0.0097	0.1859	0.0339	0.2895	0.1391	0.292	0.6	0.0204

Nota. IV = Índice de vegetación, NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada, SPAD = Desarrollo del análisis de suelo y planta, NDRE = Índice de diferencia normalizada del borde rojo, VANT = Vehículo aéreo no tripulado, DDS: Días después de la siembra.

Fuente: Elaboración propia.

Las correlaciones obtenidas sugieren que, en la predicción del rendimiento de peso fresco de girasol forrajero en etapa temprana (60 DDS), el NDVI es un predictor efectivo, mientras que, en etapas fisiológicas avanzadas (86 DDS), el NDRE resulta más adecuado. Derivado de las correlaciones significativas, se estimaron tres ecuaciones de regresión lineal simple (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones de regresión para predecir el rendimiento en función de NDVI y NDRE.

IV y DDS	Ecuación	R ²
NDVI 60 DDS (Greenseeker)	Rend = -2.8867 + 4.8379 NDVI	0.4111
NDVI 60 DDS (VANT)	Rend = 2.4967 - 2.1857 NDVI	0.1715
NDRE 86 DDS	Rend = 0.3247 + 2.4536 NDRE	0.3664

Nota. IV = Índice de vegetación, NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada, NDRE = Índice de diferencia normalizada del borde rojo, DDS = Días después de la siembra.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Justo (2024) indica que en etapas tempranas el cultivo de girasol presenta valores bajos de NDVI, pero aumentan progresivamente durante el crecimiento hasta alcanzar un pico entre 0.65 a 0.75, cuando la cobertura foliar es densa y el cultivo se encuentra en etapa reproductiva (R3-R4). A su vez, Yin *et al.* (2022) mencionan que las concentraciones de clorofila detectadas mediante VANT son herramientas fiables para monitorear la fenología. Se ha comprobado que la clorofila es un buen estimador foliar en cultivos planófilos como el girasol, cuyas hojas se disponen horizontalmente. En contraste, el NDRE presentó valores significativamente más bajos pero significativo, lo que coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio a los 86 DDS. Posteriormente, la disminución del NDVI se atribuye al inicio de la senescencia foliar, un proceso natural ligado a la maduración del cultivo que reduce la reflectancia en NIR a medida que las hojas envejecen (Kharuf *et al.*, 2018).

El desarrollo de las plantas se ve influido por diversas condiciones, lo que se refleja en la variación de la biomasa fotosintéticamente activa. Esta variación puede medirse mediante índices espectrales como el NDVI. Estos patrones representan las etapas fenológicas y muestran correlaciones positivas para estimar la biomasa con el NDVI, incluso en fases iniciales del cultivo. Aunque las revisiones resaltan el potencial de NDVI y NDRE para zonificación y predicción en girasol (Centorame *et al.*, 2024), estudios indican que el uso de estas herramientas de teledirección permite determinar el índice de vegetación y estimar nutrientes en plantas con alta precisión (Hashim *et al.*, 2021). También representan una opción económica para predecir la producción y optimizar los costos (Costa *et al.*, 2020).

Aunque todas las ecuaciones fueron estadísticamente significativas, los coeficientes de determinación (R^2) fluctuaron entre 0.1715 y 0.4111, lo que indica que, aunque existe una relación verdadera entre los índices evaluados y el rendimiento, una proporción de la variabilidad en el rendimiento no es explicada por estos indicadores. Esto sugiere la influencia de factores no cuantificados en este estudio, como la heterogeneidad edáfica, pues existen diversos factores relacionados con el suelo que inciden en la expresión del desarrollo de las plantas y, por tanto, afectan los índices medidos.

Conclusiones

El uso de Greenseeker® y VANT demostró ser eficaz para monitorear el NDVI en etapas tempranas y predecir producción en girasol forrajero en el Valle del Yaqui. Ambos métodos detectaron la disminución del índice con el avance fenológico, asociado al inicio de la senescencia. La integración de ambas herramientas constituye una estrategia confiable de medición que se alinea con los enfoques modernos de teledetección que optimizan el manejo en agricultura de precisión, permitiendo zonificación espacial y la predicción oportuna del rendimiento de biomasa forrajera en sistemas forrajeros de zonas áridas. Sin embargo, como indican revisiones recientes, hay brechas en estudios sobre girasol en regiones áridas y variedades forrajeras donde el uso de imágenes multiespectrales podría potenciar el uso de índices para un manejo eficiente de los insumos.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada para los estudios doctorales de Elco Humberto García Bolívar.

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflicto de interés.

Referencias

- Aires, U. R. V., Martins, V. S., Ferreira, L. B., Huang, Y., Heintzman, L., & Ouyang, Y. (2025). Impact of sampling techniques on crop type mapping using multi-temporal composites from Harmonized Landsat-Sentinel images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237, 110676. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110676>
- Amankulova, K., Farmonov, N., Mukhtorov, U., & Mucsi, L. (2023). Sunflower crop yield prediction by advanced statistical modeling using satellite-derived vegetation indices and crop phenology. *Geocarto International*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197509>
- Ang, Y., Che'Ya, N. N., Roslin, N. A., & Ismail, M. R. (2020). Rice chlorophyll content monitoring using vegetation indices from multispectral aerial imagery. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 28(3), 779-795. https://www.researchgate.net/publication/343022828_Rice_Chlorophyll_Content_Monitoring_using_Vegetation_Indices_from_Multispectral_Aerial_Imagery
- Bijay-Singh, & Ali, A. M. (2020). Using hand-held chlorophyll meters and canopy reflectance sensors for fertilizer nitrogen management in cereals in small farms in developing countries. *Sensors*, 20(4), 1127. <https://doi.org/10.3390/s20041127>
- Boiarskii, B. (2019). Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, (4). <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Centorame, L., Ilari, A., Del Gatto, A., & Pedretti, E. F. (2024). A systematic review on precision agriculture applied to sunflowers, the role of hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 222, 109097. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109097>
- Chiradza, T. O., Mutengwa, C. S., & Chiuta, N. E. (2025). Response of sunflower genotypes to salinity stress under laboratory conditions. *Stresses*, 5(3), 50. <https://doi.org/10.3390/stresses5030050>
- Costa, L., Nunes, L., & Ampatzidis, Y. (2020). A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105334>
- De Freitas, G., Azevedo, D., Gonсалvez, E. M., Soares, G., Garafalo, L. H., Feitosa, A. C., & Calado, J. A. (2016). Growth and physiological responses of sunflowers grown under levels of water replacement and potassium fertilization. *African Journal of Agricultural Research*, 11(14), 1273-1281. <https://doi.org/10.5897/ajar2016.10852>
- De Souza, R., Buchhart, C., Heil, K., Plass, J., Padilla, F. M., & Schmidhalter, U. (2021). Effect of time of day and sky conditions on different vegetation indices calculated from active and passive sensors and images taken from UAV. *Remote Sensing*, 13(9), 1691. <https://doi.org/10.3390/rs13091691>
- Debaeke, P., Attia, F., Champolivier, L., Dejoux, J. F., Micheneau, A., Bitar, A. A., & Trépos, R. (2023). Forecasting sunflower grain yield using remote sensing data and statistical models. *European Journal of Agronomy*, 142, 126677. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126677>
- Hashim, W., Eng, L. S., Alkaws, G., Ismail, R., Alkahtani, A. A., Dzulkifly, S., Baashar, Y., & Hussain, A. (2021). A hybrid vegetation detection framework: integrating vegetation indices and convolutional neural network. *Symmetry*, 13(11), 2190. <https://doi.org/10.3390/sym13112190>
- Hernández, A., Jensen, K., Larson, S., Larsen, R., Rigby, C., Johnson, B., Spickermann, C., & Sinton, S. (2024). Using unmanned aerial vehicles and multispectral sensors to model forage yield for grasses of semiarid landscapes. *Grasses*, 3(2), 84-109. <https://doi.org/10.3390/grasses3020007>
- Hnizil, O., Baidani, A., Khilila, I., Nsarellah, N., Laamari, A., & Amamou, A. (2024). Integrating NDVI, SPAD, and Canopy temperature for strategic nitrogen and seeding rate management to enhance yield, quality, and sustainability in wheat cultivation. *Plants*, 13(11), 1574. <https://doi.org/10.3390/plants13111574>
- Hussain, M., Farooq, S., Hasan, W., Ul-Allah, S., Tanveer, M., Farooq, M., & Nawaz, A. (2018). Drought stress in sunflower: physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, 201, 152-166. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.028>
- Justo, I. (2024). *Seguimiento de los puntos críticos del cultivo de girasol para producción de semillas híbridas* [Trabajo de intensificación, Universidad Nacional del Sur, Departamento de Agronomía]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Sur. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6946>

- Karaca, C., Peña-Fleitas, M. T., Rodríguez, A., Gallardo, M., Thompson, R. B., & Padilla, F. M. (2025). Comparison of vegetation indices measured with proximal reflectance sensing to assess leaf N content and estimate crop yield in vegetable crops. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101369. <https://doi.org/10.1016/j.jatech.2025.101369>
- Kharuf, G. S., Hernández, S. L., Orozco, M. R., Aday, D. O. C., & Delgado, M. I. (2018). Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 39(2), 7991. https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-5928201800020079
- Mba, P. C., Njoku, J. N., & Uyeh, D. D. (2025). Enhancing resilience in specialty crop production in a changing climate through smart systems adoption. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100897. <https://doi.org/10.1016/j.jatech.2025.100897>
- Meloni, R., Cordero, E., Capo, L., Reyneri, A., Sacco, D., & Blandino, M. (2024). Optimizing nitrogen rates for winter wheat using in-season crop N status indicators. *Field Crops Research*, 318, 109545. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109545>
- Mostafa, H., El-Ansary, M., Awad, M., & Husein, N. (2021). Water stress management for sunflower under heavy soil conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 23(2), 76-84. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/6639>
- Puttha, R., Venkatachalam, K., Hanpakdeesakul, S., Wongsu, J., Parametthanuwat, T., Srean, P., Pakeechai, K., & Charoenphun, N. (2023). Exploring the potential of sunflowers: agronomy, applications, and opportunities within bio-circular-green economy. *Horticulturae*, 9(10), 1079. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101079>
- Ren, W., Li, X., Liu, T., Chen, N., Xin, M., Qi, Q., & Liu, B. (2026). Controlled-release fertilizers increase sunflower yield by regulating soil nitrogen, photosynthesis, and root structure in arid regions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1747095. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1747095>
- Sarazin, V., Duclercq, J., Guillot, X., Sangwan, B., & Sangwan, R. S. (2017). Water-stressed sunflower transcriptome analysis revealed important molecular markers involved in drought stress response and tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 142, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.08.005>
- SAS Institute Inc. (2023). *JMP*®, Version 17.0.0 [Software].
- Sharifi, A., & Felegari, S. (2023). Remotely sensed normalized difference red-edge index for rangeland biomass estimation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: an International Journal*, 95(7), 1128-1136. <https://doi.org/10.1108/aeat-07-2022-0199>
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*, 91(1), 37-46. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5>
- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017(1), 1-17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yin, G., Verger, A., Descals, A., Filella, I., & Peñuelas, J. (2022). A broadband green-red vegetation index for monitoring gross primary production phenology. *Journal of Remote Sensing*, 9764982. <https://doi.org/10.34133/2022/9764982>
- Zhang, J., Zhang, H., Sima, M. W., Trout, T. J., Malone, R. W., & Wang, L. (2021). Simulated deficit irrigation and climate change effects on sunflower production in Eastern Colorado with CSM-CROPGRO-Sunflower in RZWQM2. *Agricultural Water Management*, 246, 106672. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106672>