

Análisis del estrés hídrico en frijol utilizando imágenes multiespectrales y sensores de humedad del suelo

Analysis of water stress in a bean crop using multispectral imaging and soil moisture sensors

Nestor Magdaleno Montoya-Pineda¹ , Martín Cadena-Zapata^{2*} , Alejandro Zermeño-González³ , Mario Alberto Méndez-Dorado² , Andrés Cadena-Díaz² , Ariel Méndez-Cifuentes² 

¹Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

²Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

³Departamento de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: martin.cadena@uaaan.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 16 de agosto 2025

Aceptado: 09 de enero 2026

RESUMEN. El objetivo del estudio fue analizar tres índices y dos bandas de reflectancia obtenidas con imágenes multiespectrales capturadas con drones, para evaluar el grado de estrés de un cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), bajo tres niveles de tensión de la humedad del suelo y dos posiciones de la cinta de riego (superficie y enterrada). Los resultados del estudio mostraron que el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y la reflectancia en la banda del borde del rojo (RE), tienen una mejor relación con el contenido de humedad obteniendo diferencias significativas de mayor contenido de humedad en los tratamientos de cinta enterrada y los tratamientos de menor tensión de humedad. Con el índice de diferencia normalizada del borde rojo (NDRE) se detectó diferencias significativas de mayor vigor (mayor contenido de clorofila) y por ende menos estrés con las plantas regadas con la cinta enterrada, para los tratamientos de tensión de humedad un mayor índice NDRE representa mayor contenido de humedad. Con el índice de verdor triangular (TGI) solo se detectó diferencia en el vigor de las plantas (en el contenido de clorofila) en las tensiones de humedad cuando se comparó 30 kPa y 50 kPa. Con la reflectancia en la banda del rojo (R) se detectó mayor estrés hídrico en las plantas regadas con la cinta en la superficie, pero no se detectaron diferencias en las plantas sometidas a las tensiones de 20 kPa y 50 kPa.

Palabras clave: Manejo del agua, sensores remotos, optimización del riego, sistemas de riego y tecnología agrícola.

ABSTRACT. The objective of this study was to analyze three index and two reflectance bands obtained with multispectral images captured by drones, to evaluate the degree of stress of a bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.), under three levels of soil moisture tension and two positions of the drip irrigation tape (surface and buried). The results of the study showed that the Normalized Difference Water Index (NDWI) and the reflectance in the red-edge band (RE) had a better relationship with the moisture content resulting in high significant differences of more moisture content in treatment of buried drip irrigation tape and in the treatments of lower moisture tension. With the Normalized Difference Red Edge Index (NDRE), higher chlorophyll content (lower stress level) was detected in plants irrigated with the buried irrigation tape, for the treatments of lower water tension, a higher NDRE index represents a higher water content. With the Triangular Greenness Index (TGI), only was detected significant differences in the plant vigor (chlorophyll content of the leaves) in the water tensions of 30 kPa and 50 kPa based on the position of the tape or the difference between 20 kPa and 50 kPa of soil moisture tension. By analyzing the values of reflectance in the red band (R), a higher water stress was detected in the treatment of plants irrigated with the tape on the surface, but no differences in chlorophyll content of the leaves of plants were detected at tensions of 20 kPa and 50 kPa.

Key words: Water management, remote sensor, irrigation optimization, irrigation systems and agricultural technology.

INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las leguminosas más consumidas en México y otros países del mundo (Rodríguez-Fernández y Sánchez-Mora 2021). En México el consumo per cápita anual de frijol es de 9 kg año⁻¹ (SADER 2022). En el 2021 la cosecha fue de 1.60 millones de hectáreas con una producción de 1.176 millones de toneladas; de estas, el 87.2% fue de temporal y el 12.8% a riego (FIRA 2022). En el mismo año México importó 177.5 mil toneladas y exportó 37.2 mil toneladas de frijol (FIRA 2022).

El estrés hídrico severo puede afectar el crecimiento, rendimiento y calidad de la semilla del cultivo de frijol (Perna *et al.* 2022), por lo que, la detección del estrés hídrico de este cultivo es esencial para optimizar la productividad y la calidad de las cosechas (Javornik *et al.* 2023, Kamate *et al.* 2023). Además, la detección temprana permite la intervención oportuna para mitigar el efecto en el crecimiento y desarrollo de las plantas, y en la reducción del rendimiento (Ohya *et al.* 2002). Con los tensiómetros se puede determinar el momento oportuno para la aplicación de los riegos, para obtener rendimientos óptimos de los cultivos, mejorando al mismo tiempo la eficiencia del uso del agua (Bwambale *et al.* 2023)

Con la teledetección se puede obtener información sobre la salud de los cultivos, las condiciones del suelo, y la dinámica de los ecosistemas (Zhang *et al.* 2023). La teledetección proximal mediante vehículos aéreos no tripulados (UAS) se ha empleado para identificar el estrés hídrico excesivo en la soja (*Glycine max*) y prever posibles bajas en el rendimiento (Verma *et al.* 2023). También Saravia *et al.* (2023) demostraron la utilidad de las imágenes multiespectrales y las herramientas UAS para predecir con precisión el rendimiento de cuatro cultivares de frijol en diferentes etapas fenológicas. Mientras que, Lipovac *et al.* (2022) reporta que los índices NDVI, MCARI1 y GNDVI, generados a partir de imágenes multiespectrales detectaron el estrés hídrico en frijol bajo condiciones de riego deficitario. Sobre lo mismo Okayama *et al.* (2025) utilizaron la correspondencia de imágenes RGB de hojas de persimonia con diferentes estados de humedad del suelo para entrenar un algoritmo como herramienta de decisión que identifica estrés hídrico para aplicar el riego en frutales.

Los drones pueden clasificarse, de manera general, como plataformas para el transporte de equipos de percepción remota o teledetección (Bhushan y Negi 2023). La información generada mediante estos sistemas resulta útil para la toma de decisiones relacionadas con la aplicación del riego y, más recientemente, para el transporte de equipos destinados a la aplicación de insumos en tasa variable, lo que contribuye a una mayor eficiencia en su uso (Rathod y Shinde 2023). Debido a lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la relación entre los índices de vegetación y las reflectancias de las bandas con el grado de estrés hídrico del cultivo de frijol entre la posición de la cinta de riego y tres niveles de tensión de humedad. La hipótesis planteada es que existe una relación entre los índices de vegetación y las reflectancia de las bandas obtenidos con imágenes multiespectrales capturadas con drones y la tensión de la humedad en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el campo agrícola experimental del Jardín Hidráulico del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila de Zaragoza. Sus coordenadas en grados decimales son: Latitud 25.3576127 y Longitud -101.0405497, a 1 743 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). La temperatura y precipitación media anual son 16.9 °C y 435 mm, respectivamente. El lote experimental fue una superficie de 420 m², equipada con un sistema de riego por goteo, con una separación entre goteros de 20 cm y un gasto de 2.0 L min⁻¹. El suelo presenta textura migajón-arcillosa, pH ligeramente alcalino (7.92), baja salinidad, CE baja (0.82 dS m⁻¹) y moderada materia orgánica (2.38%). Su porosidad (37.97%) y densidad aparente (1.47 g cm³). El lote se dividió en cuatro secciones, cada una equipada con una válvula independiente, lo que permitió operar el sistema de riego de forma individual en cada sección.

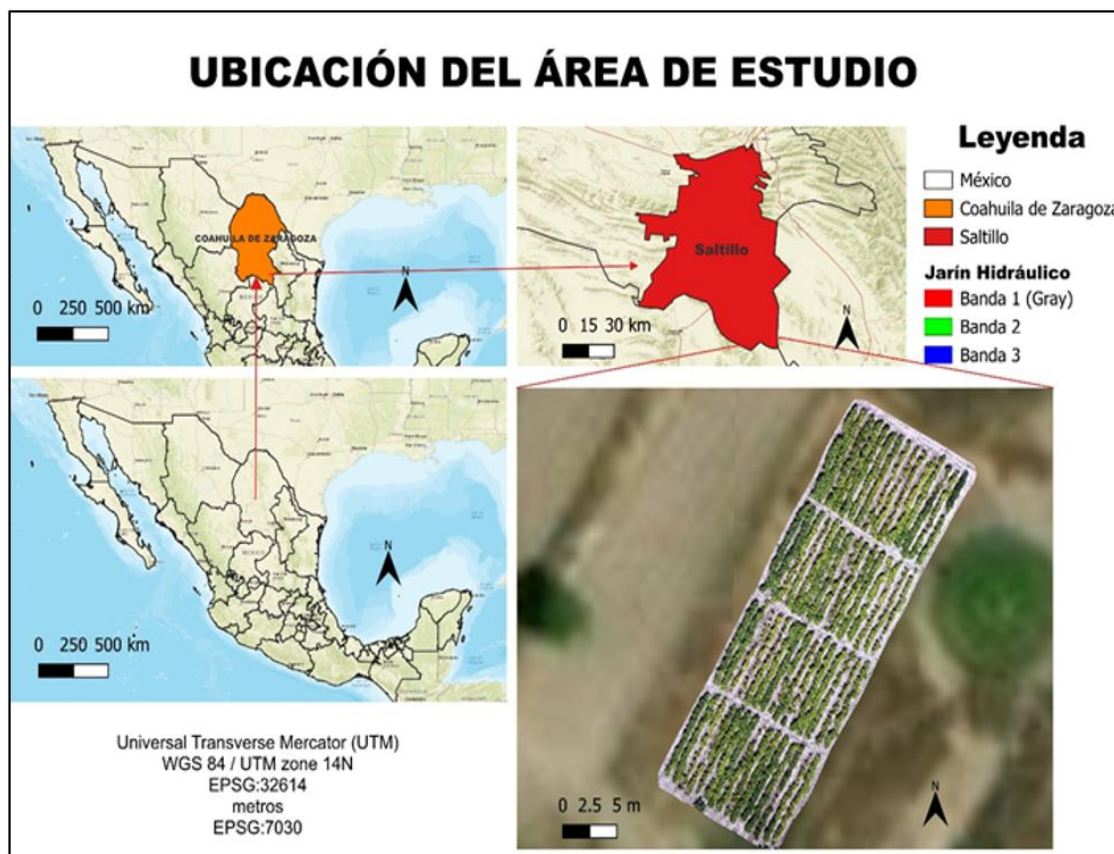


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Manejo agronómico del cultivo

El 15 de agosto de 2023, se sembró el frijol 'Flor de Mayo AN-05' con una separación de 80 cm entre surcos y 10 cm entre plantas. La dosis de fertilización, control de plagas y enfermedades fue igual para todos los tratamientos.

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño de bloques al azar con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela mayor (Factor A) fue la posición de la cinta de riego (superficial o enterrada) y la menor (Factor B) correspondió al nivel de tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos (20, 30 y 50 kPa), que resultó en seis tratamientos que se repitieron cuatro veces (Tabla 1). Para la comparación múltiple de media de tratamientos se usó la prueba Tukey ($\alpha \leq 0.05$). Cada parcela de estudio fue de dos surcos de 8 m de longitud para la cinta enterrada y tres surcos de 4 m de longitud para la cinta superficial, para el análisis de varianza del efecto del estrés en el rendimiento y calidad de la semilla se tomaron 20 plantas de cada repetición de los diferentes tratamientos. La tensión de humedad del suelo se midió con dos tensiómetros (Irrometer, Inc., Riverside, CA, USA) de 30 cm de longitud, enterrados a 20 cm de profundidad en el centro de la cama en tres repeticiones de cada tensión de humedad.

Tabla 1. Factores principales de estudio y tratamientos correspondientes

Factor A Posición de la cinta de riego	Factor B Tensión de humedad del suelo (kPa)	Tratamiento
Superficial	20	T1
Superficial	30	T2
Superficial	50	T3
Enterrada a 20 cm	20	T4
Enterrada a 20 cm	30	T5
Enterrada a 20 cm	50	T6

Tratamientos evaluados

La toma de imágenes inició a partir de los 56 DDS y continuó hasta los 83 DDS, aplicando un volumen de agua específico por tratamiento hasta alcanzar la saturación: 1.205 m³ para 20 kPa, 1.7220 m³, para 30 kPa y 2.328 m³ para 50 kPa. Una vez aplicado el primer tratamiento, se repitió cada vez que el suelo alcanzaba el nivel de tensión correspondiente (20, 30 y 50 kPa), llevándolo nuevamente a saturación. La frecuencia del riego varió según el nivel de tensión y las condiciones climáticas presentes. Todos los tratamientos de tensión fueron evaluados en dos posiciones de la cinta de riego, en la superficie y a 20 cm de profundidad.

Tensión de humedad del suelo

Para determinar los niveles de tensión de humedad del suelo experimentados por el cultivo (baja, medio y alta), se determinó una curva de retención de humedad del suelo. Esto implicó medir simultáneamente el contenido de agua del suelo utilizando una sonda TDR (Time Domain Reflectometry) con varillas de 20 cm (modelo HydroSense II, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, EE. UU.) y promediar los datos de 3 tensiómetros marca Irrometer instalados a una profundidad de 20 cm. Las mediciones abarcaron desde la saturación por riego hasta una tensión de 62 kPa. La Figura 2 ilustra la correlación entre el contenido de agua del suelo (% en volumen) y la tensión de humedad respectiva. También se observa relación entre la tensión de humedad del suelo (kPa) y el contenido volumétrico de agua (% en volumen), ajustada a un polinomio de segundo orden ($R^2 = 0.9896$). La curva indica que el contenido de agua disminuye conforme aumenta la tensión. De

acuerdo con el gráfico, los niveles de 20, 30 y 50 kPa se seleccionaron como bajo, medio y alta, tensión respectivamente, por la reducción progresiva del contenido de agua en el suelo.

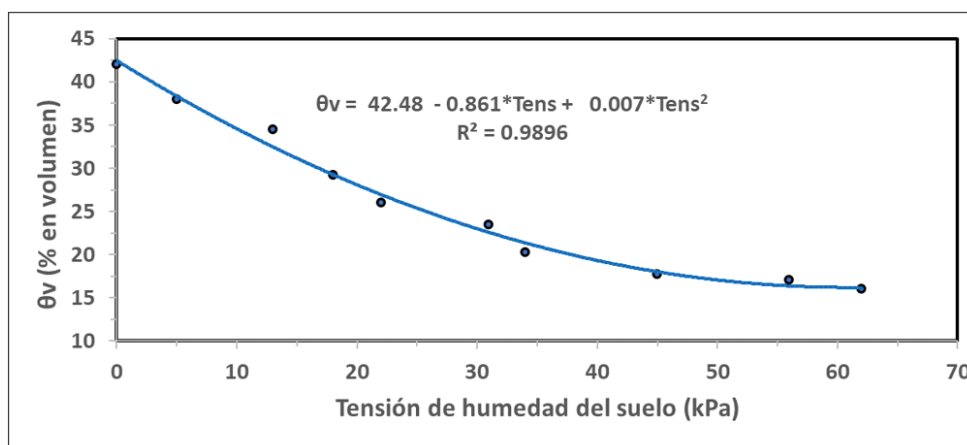


Figura 2. Relación entre el contenido de agua en el suelo y la tensión de humedad correspondiente del suelo del sitio de estudio.

Adquisición de imágenes

La captura de imágenes inició el 13 de octubre de 2023 a los 59 DDS al inicio de la etapa de floración, una vez alcanzado el primer nivel de tensión de 20 kPa. Posteriormente, se continuó con las mediciones conforme se alcanzaban los niveles de tensión de humedad del suelo correspondientes a cada tratamiento, posterior al vuelo se llevó nuevamente a saturación el suelo. Las imágenes se capturaron en un horario entre 12:00 a 14:00 h, descartando los días con presencia de nubosidad. Las fechas de toma de imágenes (vuelos) para la tensión de 20 kPa fueron: 13, 17, 19 y 21 de octubre de 2023; para 30 kPa: 17, 20, 22 y 25 de octubre de 2023; y para 50 kPa: 18, 23, 29 de octubre y 6 de noviembre de 2023. Para la captura de las imágenes se utilizó como transporte una aeronave Phantom 4 Pro (DJI Technology Co., Ltd.) (Figura 3a), pilotada de manera remota, a la cual se le acopló un sensor multiespectral RedEdge-MX™ (MicaSense, Seattle, WA, EE. UU.) (Figura 3b).

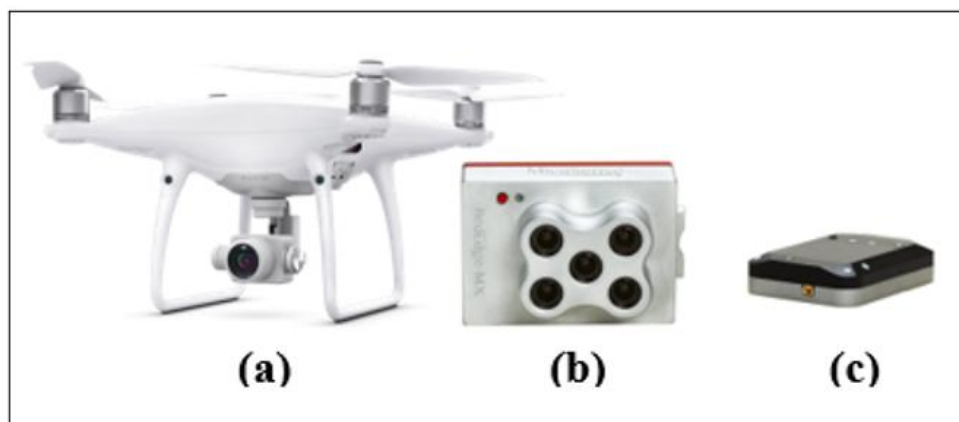


Figura 3. Equipo utilizado para el levantamiento de imágenes: (a) Cámara multiespectral; (b) Sensor solar (DLS 2); (c) RPA utilizado para el estudio.

Las imágenes se capturaron bajo los siguientes parámetros de vuelo: velocidad de 9.6 km h⁻¹, altura de 20 m, tiempo de captura de 1.0 s, y solapamiento de las imágenes del 80%. Esto resultó en un GSD (Distancia de Muestreo del Suelo) de 1.4 cm píxel⁻¹.

Procesamiento de imágenes multiespectrales

Se usó Pix4Dmapper (v.4.6.4, Pix4D S.A., Prilly, Suiza) que incorpora correcciones automáticas del ángulo del sol en condiciones nubladas para procesar las imágenes y obtener los índices de vegetación (BNDVI, GNDVI, LCI, MCARI, NDRE, NDVI, NDWI, SIPI2 y TGI), y el ortomosaico de reflectancia de bandas (Azul, Verde, NIR, Red Edge y Rojo). Se utilizaron GCP (Ground Control Point) para la alineación de los ortomosaicos obtenidos del procesamiento. Ajustando la resolución espacial de los ortomosaicos a un GSD (Ground Sampling Distance) de 2 cm píxel⁻¹ para dar uniformidad, calidad y detalle.

Extracción de regiones de interés

Los datos obtenidos en los diferentes tratamientos de tensión de humedad del suelo, se evaluaron como variables de respuesta, y se seleccionaron los tres índices con mayor coeficiente de variación: Borde Rojo de Diferencia Normalizada (NDRE), Índice de Verdor Triangular (TGI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). Además de la reflectancia de la banda Roja (R) y la reflectancia de la banda Red Edge (RE). Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk y la de Bartlett para observar la normalidad y homogeneidad de los datos de cada índice. El análisis de varianza de los tratamientos se realizó con RStudio (versión 2023.06.1 Build 524).

En cada uno de los tratamientos y repeticiones en los bloques, se empleó una máscara de tipo Shape para calcular los promedios de los índices de vegetación y los valores de los niveles digitales (ND). Para ello, se definieron zonas de muestreo rectangulares de 2 m × 0.20 m, con un total de tres por cada repetición del tratamiento por bloque. Para automatizar este proceso, se desarrolló un script en Python que permite extraer los datos de acuerdo con el factor (A o B), tratamiento y fecha.

RESULTADOS

Índice borde rojo de diferencia normalizada (NDRE)

El NDRE es un índice con el que se infiere el contenido de clorofila de una superficie vegetal, valores altos del NDRE indican mayor contenido de clorofila. El análisis de varianza mostró que, para cualquier tensión de humedad del suelo, el contenido de clorofila de las hojas de las plantas de frijol fue significativamente mayor bajo el tratamiento de cintilla enterrada (15 cm bajo la superficie), respecto a las plantas con la cinta en la superficie (Figura 4) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

En la misma figura también se observa que para cualquier condición de la posición de la cinta de riego, el contenido de clorofila es igual para los tratamientos en 50 y 20 kPa (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). La interacción entre la posición de la cinta de riego y la tensión de humedad del suelo para la ampliación del riego mostró que, el NDRE es mayor con la cinta enterrada en las tensiones de 50 kPa y 20 kPa y decrece apreciablemente con la cinta en la superficie. El menor valor del NDRE fue en la tensión de 30 kPa en ambas posiciones de la cinta (Figura 4). El NDRE mayor se observó en

el tratamiento seis y cuatro que corresponden a las plantas regadas con la cinta enterrada con tensiones de 50 y 20 kPa. (Figura 4) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

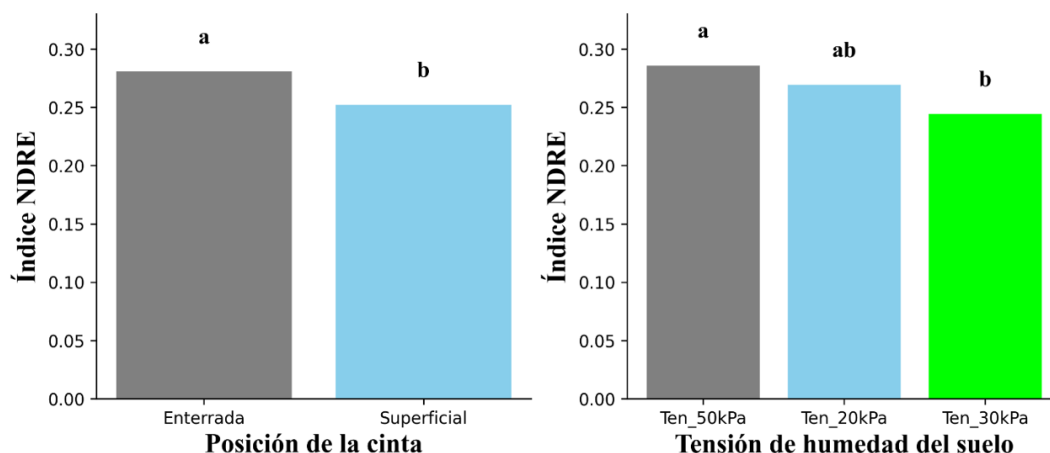


Figura 4. Efecto de la posición de la cinta de riego (enterrada, superficial) y la tensión de humedad del suelo para riego aplicada sobre el índice NDRE de un cultivo de frijol (cv Flor de mayo).

Índice de verdor triangular (TGI)

El TGI es un índice que se utiliza para estimar los niveles de clorofila y nitrógeno en las hojas de las plantas. Un TGI mayor sugiere más clorofila y nitrógeno, potencialmente ligados a mayor vigor de la vegetación. Para cualquier condición de tensión de la humedad del suelo, el TGI fue igual para el dosel de las plantas regadas con cinta enterrada o en la superficie (Figura 5) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), lo que indica que la posición de la cinta de riego no afectó el contenido de clorofila de las plantas. También se observa que, para cualquier condición de la posición de la cinta de riego, el TGI es igual en la tensión de 20 y 50 kPa, lo que sugiere que el estrés hídrico causado al regar a 50 kPa, no afectó el contenido de clorofila ni el vigor de las plantas (Figura 5).

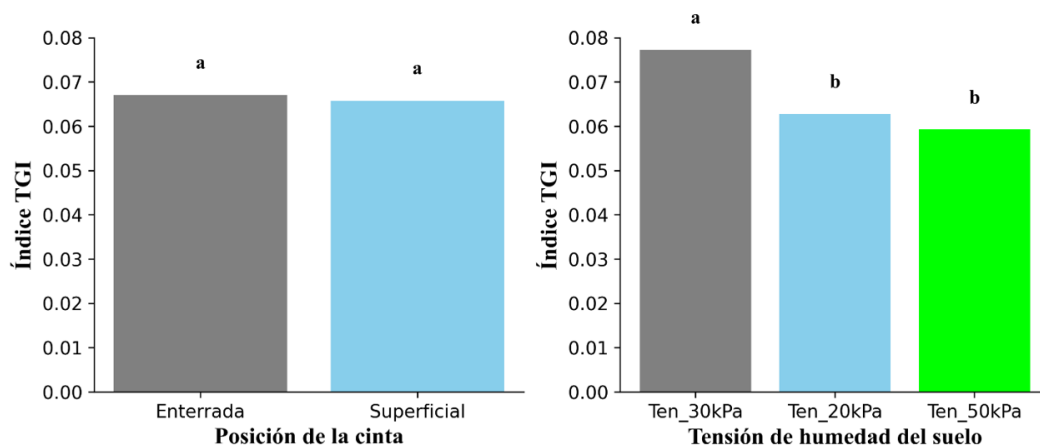


Figura 5. Efecto de la posición de la cinta de riego (enterrada, superficial) y la tensión de humedad del suelo para riego aplicada sobre el índice TGI de un cultivo de frijol (cv Flor de mayo).

La interacción entre la posición de la cinta de riego y la tensión de humedad del suelo muestra que, el valor mayor de TGI para las dos condiciones de la posición de la cinta de riego se observa en la

tensión de 30 kPa (Figura 5) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). En la misma figura se observa que, para el riego con la cinta enterrada el TGI es casi igual en las tensiones de 20 kPa y 50 kPa, pero cuando las plantas se riegan con la cinta de riego en la superficie, el TGI es mayor en la tensión de 20 kPa que en la tensión de 50 kPa.

Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

El enfoque ideado por McFeeters (1996) utiliza el índice (NDWI) para detectar cuerpos de agua basándose en los datos obtenidos de imágenes de teledetección. En este estudio, el NDWI se evaluó para ver la posibilidad de detectar diferencias en el contenido de agua de las hojas de las plantas de frijol por efecto de la posición de la cinta de riego y la tensión de humedad del suelo. En la Figura 6, se observa que, para cualquier condición de tensión de la humedad del suelo, el NDWI fue significativamente mayor en el dosel de las plantas que se regaron con la cinta enterrada, respecto a las plantas regadas con la cinta en la superficie (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), lo que sugiere un mayor contenido de agua en el dosel de las plantas regadas con la cinta enterrada.

Para cualquier condición de la posición de la cinta de riego, El NDWI, decreció significativamente con el incremento de la tensión de humedad del suelo (20 kPa, 30 kPa, 50 kPa), indicando que el contenido de agua en el dosel de las plantas disminuye con el incremento de la tensión de humedad del suelo (mayor estrés hídrico). La interacción entre los factores principales (Figura 6) y la comparación múltiple de media de tratamientos (Figura 6) también muestra que el NDWI fue mayor en el dosel de las plantas que se regaron con la cinta enterrada, y que este decrece con el incremento de la tensión de la humedad del suelo (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

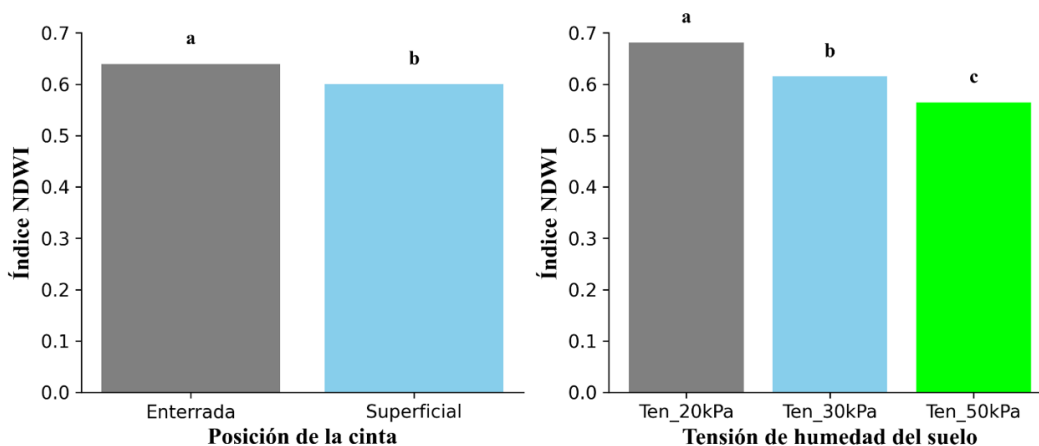


Figura 6. Efecto de la posición de la cinta de riego (enterrada, superficial) y la tensión de humedad del suelo para riego aplicada sobre el NDWI (valores absolutos) de un cultivo de frijol (cv Flor de mayo).

Reflectancia en la banda del rojo (R)

La reflectancia de la banda R es un indicador de la absorción por la clorofila y otros pigmentos importantes para la fotosíntesis. Para cualquier tensión de humedad del suelo, el follaje de las plantas regadas con la cinta enterrada, la reflectancia R fue menor (Figura 7) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), lo que sugiere un mayor contenido de clorofila del dosel de las plantas. Pero, para cualquier condición de posición de la cinta de riego la reflectancia R tuvo el mismo valor en las tensiones de humedad

del suelo de 20 kPa y 50 kPa, indicando que no existe una clara relación entre el incremento en la tensión de humedad del suelo y la reflectancia en la banda R. (Figura 7) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). En el tratamiento de la tensión de 30 kPa la reflectancia R fue mayor.

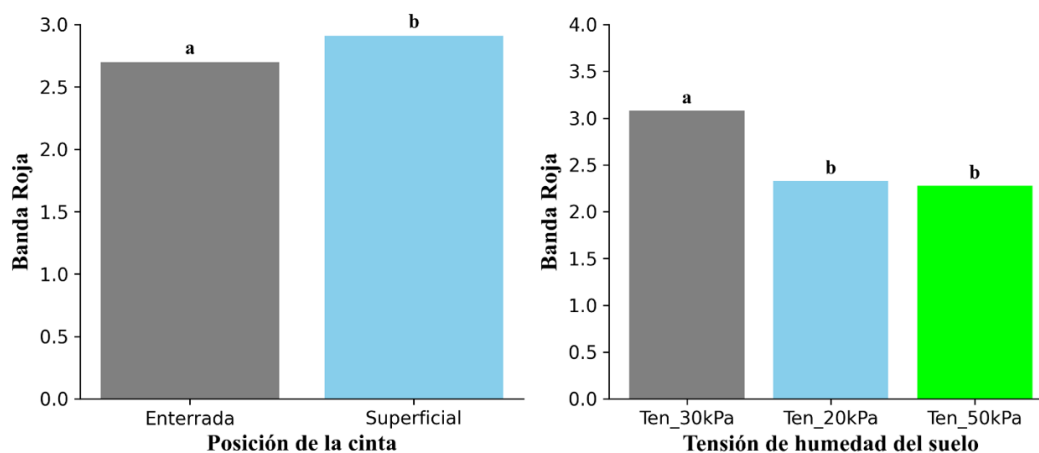


Figura 7. Efecto de la posición de la cinta de riego (enterrada, superficial) y la tensión de humedad del suelo para el riego aplicada sobre la reflectancia de la Banda Roja (miles) de un cultivo de frijol (cv Flor de mayo).

La interacción entre la posición de la cinta y la tensión de humedad del suelo (Figura 7) y la comparación múltiple de media de tratamientos (Figura 7) muestran la misma información de que, la reflectancia R menor en las plantas regadas con la cinta enterrada y que en ambas posiciones de la cinta enterrada, la reflectancia R es mayor en la tensión de humedad del suelo de 30 kPa.

Reflectancia en la banda del borde rojo (RE)

La reflectancia de la banda RE es un indicador relacionado a la deficiencia de nutrientes, enfermedades o sequías. Un valor mayor de la reflectancia RE indica mayor disponibilidad de agua (menor sequía). En este estudio, la banda RE se usó para ver la posibilidad de detectar diferencias en sequía (diferencias en contenido de agua en el dosel de las plantas) por efecto de la posición de la cinta de riego y por la tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos. En la Figura 8, se observa que, para cualquier valor de tensión de humedad del suelo, la reflectancia RE fue mayor con el tratamiento de la cinta de riego enterrada (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), indicando un mayor contenido de agua en el dosel de las plantas. En la misma figura también se observa que la reflectancia RE tiene diferencias significativas a cada tratamiento de tensión de humedad es menor en la tensión de 50 kPa, indicando un menor contenido de agua del dosel de las plantas respecto a las tensiones de 20 kPa y 30 kPa. Además, en la Figura 8, se muestra que para las dos condiciones de la cinta de riego la reflectancia RE fue menor en la tensión de 50 kPa, indicando nuevamente menor turgencia de las hojas del dosel de las plantas.

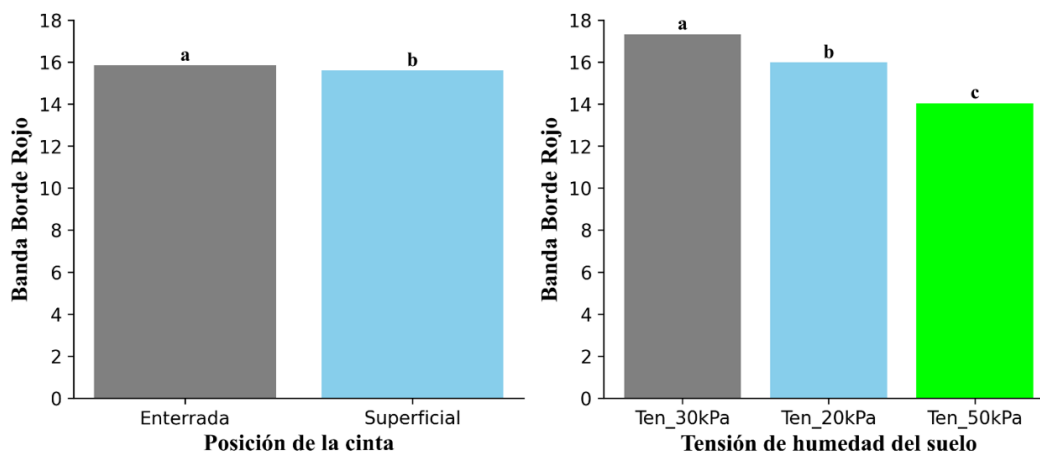


Figura 8. Efecto de la posición de la cinta de riego (enterrada, superficial) y la tensión de humedad del suelo para el riego aplicada sobre la reflectancia de la Banda de Borde Rojo (miles) de un cultivo de frijol (cv Flor de mayo).

DISCUSIÓN

Índice de diferencia normalizada del extremo rojo (NDRE)

El NDRE fue mayor (para cualquier condición de tensión de la humedad del suelo) en el dosel de las plantas que se irrigaron con la cinta enterrada respecto al tratamiento con cinta en la superficie, lo que significa un mayor contenido de clorofila y por consiguiente un menor grado del grado de estrés hídrico de las plantas. Este resultado se asocia a una mayor disponibilidad de agua para las raíces de las plantas por el riego con la cinta enterrada, y que el NDRE lo pudo detectar. Al respecto, (Jorge *et al.* 2019) encontraron que el NDRE es efectivo para detectar diferencias en el crecimiento de los cultivos, que está relacionado con el contenido de clorofila de las hojas de las plantas. El NDRE es más sensible que el NDVI para detectar áreas con bajo contenido de clorofila (deficiencias de nitrógeno) (Boiarskii 2019). Sin embargo, para cualquier condición de la posición de la cinta de riego, el NDRE fue igual para la tensión de 20kPa y 50 kPa. Este resultado implica que, el NDRE no pudo detectar la diferencia en el contenido de clorofila en el dosel de las plantas de frijol entre las tensiones mencionadas, o que, la diferencia en el grado de estrés hídrico entre 20 kPa y 50 kPa no afectó el contenido de clorofila de las hojas, y que, la posición de la cinta de riego tiene más efecto en el contenido de clorofila de las hojas de las plantas, que la tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos. Con el NDRE fue posible identificar el estrés hídrico en diferentes fases de crecimiento en el arroz de temporal (Visitacion *et al.* 2022).

Índice de verdor triangular (TGI)

El TGI del dosel de las plantas fue igual para las dos condiciones de la posición de la cinta de riego (enterrada, superficial), para cualquier nivel de tensión de la humedad del suelo. Este resultado indica que con el TGI no se puede diferenciar el contenido de clorofila de las plantas por la posición de la cinta de riego, o que la posición de la cinta de riego no afecta el contenido de clorofila de las hojas de las plantas. Además, para cualquier posición de la cinta de riego, el TGI fue igual a 20 kPa y 50 kPa de tensión de la humedad del suelo, indicando que, con el TGI no es posible detectar

diferencias de contenido de clorofila relacionadas con el nivel del estrés hídrico, o que el incremento del estrés hídrico al regar a 50 kPa no afectó el contenido de clorofila de las hojas. En este contexto, el estudio de Miranda *et al.* (2025) mostró que con índices derivados de imágenes RGB (RGBVI, GLI, NGRDI, VARI) del dosel de un cultivo de soya pudieron ser detectadas diferencias significativas en variaciones genéticas en diferentes líneas de este, excepto con el índice de verdor triangular (TGI) donde las variaciones no fueron significativas en diferentes escenarios. Probablemente debido a que no hubo diferencias pronunciadas en el contenido de clorofila de las hojas.

La interacción entre la posición de la cinta y la tensión de humedad del suelo muestra que el TGI es igual a las tensiones de 20 kPa y 50 kPa para la cinta enterrada, pero para la cinta en la superficie el TGI es mayor en la tensión de 20 kPa que en la de 50 kPa. Los índices de vegetación como el TGI calculados a partir de cámaras digitales (RGB) de bajo costo montadas en plataformas aéreas de baja altitud pueden detectar los requerimientos de nitrógeno de los cultivos (Gerardo y de-Lima 2023, Hunt *et al.* 2012). Este es un resultado interesante, ya que, el TGI indicaría que, debido a una mayor disponibilidad del agua en las raíces de las plantas al regar con la cinta enterrada el estrés hídrico causado por regar a una tensión de 50 kPa, no afecta el contenido de clorofila de las hojas, pero al regar con la cinta en la superficie el TGI es menor en la tensión de 50 kPa, indicando un menor contenido de clorofila debido a un mayor nivel de estrés hídrico, ocasionado por menor disponibilidad de agua en las raíces de las plantas.

Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

El NDWI fue mayor en el dosel de las plantas que se regaron con la cinta enterrada, que el observado en las plantas regadas con la cinta en la superficie, para cualquier condición de tensión de humedad del suelo. El estudio de Zhang *et al.* (2018) demostró que el NDWI derivado de datos del Sentinel-2 es eficaz para evaluar el contenido de agua en el dosel de trigo de invierno, correlacionándolo significativamente con el rendimiento de los granos y las condiciones de sequía a escala regional. Este resultado muestra que, con el NDWI es posible detectar diferencias en el contenido de agua en el dosel de las plantas, ya que, al tener mayor disponibilidad de agua en las raíces de las plantas por el riego con la cinta enterrada, el nivel de turgencia de las hojas es mayor. El trabajo de Liu y Qin (2010) en Jiangxi, China, demostró que el NDWI es más sensible al contenido de agua del dosel vegetal en comparación con el NDVI, y lo hace más adecuado para monitorear el estrés hídrico a corto plazo en áreas agrícolas y boscosas.

Al disminuir la tensión de humedad del suelo (menor estrés hídrico) de 50 kPa a 30 kPa y a 20 kPa, para cualquier posición de la cinta de riego, el NDWI aumenta, indicando que con el uso de este índice es posible identificar diferencias en el contenido de agua en las hojas de las plantas (nivel de turgencia), ya que a menor estrés hídrico (menor tensión de humedad del suelo) mayor nivel de turgencia de las hojas. Al respecto, Quemada *et al.* (2021) atribuyen este fenómeno a las variaciones en la reflexión de la luz por parte de las hojas que dependen de su contenido de agua. Mientras que, Nagy *et al.* (2024) enfatizan en la importancia de los índices de vegetación, especialmente el NDWI y el NDVI, para estimar las necesidades de agua de los cultivos.

Reflectancia en la banda del rojo (R)

La reflectancia R fue menor en el dosel de las hojas de las plantas regadas con la cinta enterrada para cualquier nivel de tensión de humedad del suelo. Este resultado indica que es posible detectar diferencias en el contenido de clorofila de las hojas con la reflectancia R, ya que, al tener mayor disponibilidad de agua en las raíces las planta que se regaron con la cinta enterrada, el nivel de estrés hídrico fue menor lo que induce un mayor contenido de clorofila. Al respecto, Xue y Su (2017) mencionan que la banda roja es esencial para generar los índices de vegetación, ya que evalúa la condición de salud de las plantas a través de la absorción de la luz roja por la clorofila. Mientras que, Shi *et al.* (2023) indican que una mayor concentración de clorofila generalmente se correlaciona con mejor condición de salud y rendimiento de los cultivos. Sin embargo, con la reflectancia R no fue posible detectar diferencias en contenido de clorofila de las hojas entre la tensión de humedad del suelo de 20 kPa y 50 kPa, para cualquier posición de la cinta de riego, o que, el incremento del estrés hídrico de 20 kPa a 50 kPa, no afectó el contenido de clorofila de las hojas de las plantas. Esto puede deberse a que el rango de la banda roja 670-680 nm, existe fuerte absorbancia de clorofila, por lo que, se debe perder cantidades relativamente grandes de clorofila de las hojas antes de que se produzca una distinción óptica significativa (Carter y Knapp 2001).

Reflectancia en la banda del borde rojo (RE)

Con la reflectancia RE se detectaron diferencias en contenido de agua del dosel de las plantas entre el riego con la cinta enterrada y en la superficie, ya que, para cualquier valor tensión de humedad del suelo, la reflectancia RE fue mayor cuando las plantas fueron regadas con la cinta de riego enterrada. El estudio de Lin *et al.* (2019) demostró que la reflectancia de Red Edge responde a los niveles de clorofila en las hojas, un parámetro directamente relacionado con el proceso de fotosíntesis. La banda del borde rojo permite detectar cambios en los pigmentos de las plantas que se correlacionan con variaciones del estrés hídrico y las tasas fotosintéticas de las hojas (Easterday *et al.*, 2019). También fue posible detectar diferencias en el contenido de agua del dosel de las plantas, ya que la reflectancia RE fue mayor en las tensiones de humedad del del suelo de 20 kPa y 30 kPa que en la de 50 kPa, indicando mayor contenido de agua en el dosel de las plantas bajo menor estrés hídrico. El uso de índices de vegetación basados en la banda Red Edge, como el Índice Modificado de Absorción de Clorofila (MCARI) y el Índice Invertido de Clorofila Red Edge (IRECI), mejora significativamente la precisión en la estimación del contenido de agua en cultivos de maíz durante la temporada de crecimiento (Feng *et al.* 2023). De acuerdo con el trabajo desarrollado por Osco *et al* (2025) el índice RE comparado con otros fue el más adecuado para detectar estrés térmico inducido en plantas de frijol.

CONCLUSIONES

El incremento o decremento de los valores del índice NDWI tienen una clara relación con el incremento y decremento del contenido de humedad en el suelo a diferentes posiciones de la cintilla de riego y diferentes tensiones de humedad en el suelo. Los valores del índice NDWI estuvieron directamente relacionados con el valor de la humedad en el suelo pues tuvieron un decremento significativo conforme aumento la tensión de humedad en el suelo, lo que da la

posibilidad de utilizar este índice como criterio para aplicar el riego antes de que inicie un estrés hídrico. Los índices NDRE, TGI, así como las bandas RE y R en las condiciones del experimento no tuvieron una clara relación y sensibilidad a los cambios de tensión de humedad en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por el apoyo mediante el proyecto 2022-000018-02NACF-12359 y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro para la realización del estudio. Agradecemos a la Universidad Autónoma de Tamaulipas por la prestación de los equipos de teledetección agrícola que se emplearon para el levantamiento de datos en el cultivo de frijol.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Las bases de datos utilizados en la presente investigación se encuentran en https://alumnosuademy.sharepoint.com/:f:/g/personal/nmontoya_uat_edu_mx/EmpQhQ7n9MRKkfUtl1MMh7UB1pBY8oD_1A5qp0q2V-UzEQ

LITERATURA CITADA

- Bhushan M, Negi A (2023) Impact of UAVs in agriculture. In: Goel N, Yadav R (eds) Handbook of research on machine learning-enabled IoT for smart applications across industries IGI Global. 701 E. Chocolate Avenue, Hershey, PA 17033, USA. pp. 258-268. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8785-3.ch013>
- 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 spl1(4). <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Bwambale E, Abagale FK, Anornu GK (2023) Data-driven modelling of soil moisture dynamics for smart irrigation scheduling. Smart Agricultural Technology 5. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100251>
- Carter GA, Knapp AK (2001) Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. American Journal of Botany 88(4). <https://doi.org/10.2307/2657068>
- Easterday K, Kislik C, Dawson TE, Hogan S, Kelly M (2019) Remotely sensed water limitation in vegetation: insights from an experiment with unmanned aerial vehicles (UAVs). Remote Sensing 11(16). <https://doi.org/10.3390/rs11161853>
- Feng S, Qiu J, Crow W T, Mo X, Liu S, Wang S, Gao L, Wang X, Chen S (2023) Improved estimation of vegetation water content and its impact on L-band soil moisture retrieval over cropland. Journal of Hydrology 617. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129015>

- FIRA (2022) Panorama agroalimentario frijol 2022. <https://sursureste.org.mx/estudios/panorama-agroalimentario-frijol-2022/>. Fecha de consulta 8 de junio de 2024.
- Gerardo R, de-Lima IP (2023) Applying RGB-based vegetation indices obtained from UAS imagery for monitoring the rice crop at the field scale: a case study in Portugal. *Agriculture* 13(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture13101916>
- Hunt ER, Doraiswamy PC, McMurtrey JE, Daughtry CST, Perry EM, Akhmedov B (2012) A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21(1). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Javornik T, Carović-Stanko K, Gunjača J, Vidak M, Lazarević B (2023) Monitoring drought stress in common bean using chlorophyll fluorescence and multispectral imaging. *Plants* 12(6). <https://doi.org/10.3390/plants12061386>
- Jorge J, Vallbé M, Soler JA (2019) Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1). <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- Kamate A, Soro PA, Zoro-Diama EG, Diomande KS, Adohi-Krou AV (2023) Water stress early detection of eggplant plants by hyperspectral fluorescence spectroscopy. *Open Journal of Applied Sciences* 13(03). <https://doi.org/10.4236/ojapps.2023.133028>
- Lin S, Li J, Liu Q, Li L, Zhao J, Yu W (2019) Evaluating the effectiveness of using vegetation indices based on red-edge reflectance from sentinel-2 to estimate gross primary productivity. *Remote Sensing* 11(11). <https://doi.org/10.3390/rs11111303>
- Lipovac A, Bezdan A, Moravčević D, Djurović N, Ćosić M, Benka P, Stričević R (2022) Correlation between ground measurements and UAV sensed vegetation indices for yield prediction of common bean grown under different irrigation treatments and sowing periods. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4162287>
- LIU Xiao-Lei, QIN Zhi-Hao (2007) Comparative analysis between NDWI and NDVI indices in regional drought monitoring[J]. *Remote Sensing Technology and Application* 22(5): 608-612 <https://doi.org/10.11873/j.issn.1004-0323.2007.5.608>
- Miranda MCC, Aono AH, Fagundes TG, Arduini GM, Pinheiro JB (2025) High throughput phenotyping and machine learning techniques in soybean breeding: Exploring the potential of aerial imaging and vegetation indices. *Agronomy Journal* 117: e70012. <https://doi.org/10.1002/aj2.70012>
- McFeeters SK (1996) The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7). <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Nagy A, Kiss NÉ, Buday-Bódi E, Magyar T, Cavazza F, Gentile SL, Abdullah H, Tamás J, Fehér ZZ (2024) Precision estimation of crop coefficient for maize cultivation using high-resolution satellite imagery to enhance evapotranspiration assessment in agriculture. *Plants* 13(9). <https://doi.org/10.3390/plants13091212>
- Ohya T, Yoshida S, Kawabata R, Okabe H, Kai S (2002) Biophoton emission due to drought injury in red beans: possibility of early detection of drought injury. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers* 41(7A). <https://doi.org/10.1143/jjap.41.4766>
- Okayama A, Yamamoto A, Kimura M, Matsuno Y (2025) Utilizing convolutional neural networks (CNN) for orchard irrigation decision-making. *Environmental Monitoring and Assessment* 197: 168. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13602-1>
- Osco LP, Moriya ÉAS, de Lima BC, Ramos APM, Júnior JM, Gonçalves WN, Jorge LAdC, Liesenberg V, Li J, de Araújo ASF, Ferreira de Araújo AS, Imai NN, de Araújo FF (2025) A machine learning framework for classifying thermal stress in bean plants using hyperspectral data. *AgriEngineering* 7(11): 376. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7110376>

- Perna OF, de Lima JD, Rivadavea WR, Barbosa JM, Braganholi JH, Bazanella AP, Silva GJ (2022) Evaluation of Water stress and co-inoculation of azospirillum brasilense and rhizobium tropici in beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da Unipar 25(2c). <https://doi.org/10.25110/arqvet.v25i2conv.2022.8795>
- Quemada C, Pérez-Escudero JM, Gonzalo R, Ederra I, Santesteban LG, Torres N, Iriarte JC (2021) Remote sensing for plant water content monitoring: A review. Remote Sensing 13(11). <https://doi.org/10.3390/rs13112088>
- Rathod PD, Shinde GU (2023) Autonomous aerial system (UAV) for sustainable agriculture: A review. International Journal of Environment and Climate Change 13(8). <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i82080>
- Rodríguez-Fernández P, Sánchez-Mora C (2021) Ecological production of beans (*Phaseolus Vulgaris* L.) in the edaphoclimatic conditions of the III frente. Ciencia en su PC 2: 60-70.
- SADER (2022) Estima agricultura crecimiento de 11.4% de la producción de frijol en 2021; mantiene tendencia al alza. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/estima-agricultura-crecimiento-de-11-4-de-la-produccion-de-frijol-en-2021-mantiene-tendencia-al-alza>. Fecha de consulta: 8 de junio de 2024.
- Saravia D, Valqui-Valqui L, Salazar W, Quille-Mamani J, Barboza E, Porras-Jorge R, Injante P, Arbizu CI (2023) Yield prediction of four bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars using vegetation indices based on multispectral images from UAV in an arid zone of Peru. Drones 7(5). <https://doi.org/10.3390/drones7050325>
- Shi H, Guo J, An J, Tang Z, Wang X, Li W, Zhao X, Jin L, Xiang Y, Li Z, Zhang F (2023) Estimation of chlorophyll content in soybean crop at different growth stages based on optimal spectral index. Agronomy 13(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy13030663>
- Verma B, Porwal M, Jha AK, Vyshnavi RG, Rajpoot A, Nagar AK (2023) Enhancing precision agriculture and environmental monitoring using proximal remote sensing. Journal of Experimental Agriculture International 45(8). <https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i82168>
- Visitacion GJ, Saludes RB, Luyun RA, Pinca, YMM, Eusebio MFV (2022) Statistical analysis of crop water stress in rainfed rice (*Oryza sativa* L.) using spectral and non-spectral indices. Philippine Journal of Science 151(2). <https://doi.org/10.56899/151.02.04>
- Xue J, Su B (2017) Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of Sensors 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zhang C, Pattey E, Liu J, Cai H, Shang J, Dong T (2018) Retrieving leaf and canopy water content of winter wheat using vegetation water indices. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(1). <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2773625>
- Zhang Y, Yang Y, Zhang Q, Duan R, Liu J, Qin Y, Wang X (2023) Toward multi-stage phenotyping of soybean with multimodal UAV sensor data: A comparison of machine learning approaches for leaf area index estimation. Remote Sensing 15(1). <https://doi.org/10.3390/rs15010007>