



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



Artículo: COMEII-19043

*Mazatlán, Sin., del 18 al 20
de septiembre de 2019*

RELACIÓN DE LA ALTURA DE PLANTA DEL CULTIVO DE ARROZ BAJO ESTRÉS HÍDRICO CON ÍNDICES DE VEGETACIÓN OBTENIDAS DE IMÁGENES DE DRON

Javier Alvaro Quille Mamani^{1*}; Lía Ramos Fernández¹; Ronald Ernesto Ontiveros Capurata²; Waldo Ojeda Bustamante³; Zenaida Rossana Jorge Porras¹

¹Universidad Nacional Agraria la Molina, Maestría en Recursos Hídricos, 15464, Lima, Perú.

alvaroquille@gmail.com – (051) 941250098 (*Autor de correspondencia)

²Catedra CONACyT –IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Riego y Drenaje- Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos, México.

³Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación A.C. Texcoco, C.P. 56190, Estado de México.

Resumen

El estrés hídrico es uno de los principales factores que afecta el desarrollo de las plantas. Nuevas técnicas de medición remotas como el uso de imágenes multiespectrales pueden proporcionar una respuesta según el estado de estrés en las plantas. Se examinaron tres tratamientos de estrés hídrico correspondientes al potencial hídrico del suelo (SWP) con el objetivo de evaluar los efectos con relación a la altura de la planta de arroz y mediante índices de vegetación (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y Índice de área foliar (LAI)) de imágenes obtenidas con un dron, comúnmente llamado vehículo aéreo no tripulado (VANT). Los resultados obtenidos fueron valores de correlación entre $0.85 \geq R^2 \leq 0.89$ y $0.77 \geq R^2 \leq 0.95$ para el LAI y NDVI, con relación a la altura de planta de arroz. Este estudio demuestra la viabilidad del uso de índices de vegetación para controlar el estrés hídrico en los cultivos.

Palabras claves: Sensor remoto, LAI, NDVI, agricultura de precisión, VANT



Introducción

El arroz es el segundo cereal más cultivado en el mundo (Cui et al., 2018). Además, es de gran importancia económica y social para el Perú, aunque demanda un consumo de agua entre 12000 a 15000 m³/ha (MINAGRI, 2017).

El estrés hídrico es uno de los factores más limitantes del crecimiento, la composición y distribución de las especies que se desarrollan en climas mediterráneos (Chaves et al. 2002, Otieno et al. 2005). El déficit hídrico afecta varios aspectos del funcionamiento de las plantas, desde el metabolismo celular (incluyendo la fotosíntesis) hasta el crecimiento. Además, se refleja en la altura de la planta como una respuesta directa al estrés hídrico, que se ve reflejado en el rendimiento. En las últimas décadas, la teledetección es siempre una herramienta predominante para el monitoreo continuo y a largo plazo. La reflectancia del dosel en las longitudes de onda visibles / infrarrojas cercanas puede proporcionar información efectiva sobre el crecimiento de la vegetación, por lo tanto, se desarrollaron varios índices de vegetación (VI) basados en la reflectancia del dosel y se utilizaron con frecuencia para el monitoreo de estrés hídrico (Anderson et al., 2011; Rhee et al., 2010; Singh et al., 2003; Yoshida et al., 2015).

El índice de vegetación espectral (VI) para el monitoreo del estrés hídrico de los cultivos debido a numerosos factores de confusión (como la estructura del dosel, el fondo del suelo, el grosor de la hoja y las propiedades de la superficie de la hoja). que afectan a los VI en los niveles de la cubierta vegetal. Los índices ópticos de banda estrecha para detectar el estrés hídrico y programar el riego se han investigado ampliamente para cultivos de árboles y cereales cultivados en campo abierto (Dangwal et al., 2015; Evanidi et al., 2017; Magney et al., 2016; Panadiga et al., 2014; Rossini et al., 2013)

Entre estos VI, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se ha utilizado más ampliamente en el monitoreo de estrés hídrico (Garik Gutman, 1990; Tucker y Choudhury, 1987). Para la mayoría de los tipos de vegetación, en general, el NDVI muestra una reducción bajo el impacto de la hídrico (Lloret et al., 2007; Mänd et al., 2010; Wang et al., 2010). Además, El índice de área foliar (LAI) es una variable crítica en estos modelos para describir la estructura del dosel de la vegetación y predecir las interacciones entre la vegetación y la atmósfera.

De acuerdo a lo mencionado se planteó el siguiente objetivo de evaluar los efectos con relación a la altura de la planta de arroz y mediante índices de vegetación (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y Índice de área foliar (LAI)) de imágenes obtenidas con un dron, comúnmente llamado vehículo aéreo no tripulado (VANT).

Materiales y Métodos

Área de estudio

El experimento se realizó en el Área Experimental de Riego, Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), ubicada en la ciudad de Lima, provincia de Lima – Perú (12.08°S, 76.95°W, altitud 244 m, Figura 1).

El área experimental tiene un clima desértico árido-sub tropical, con una temperatura media anual 18.5 °C y una precipitación media anual de 90 mm y la velocidad de viento media anual 1.5 m s⁻¹. La textura del suelo es franco arenoso.

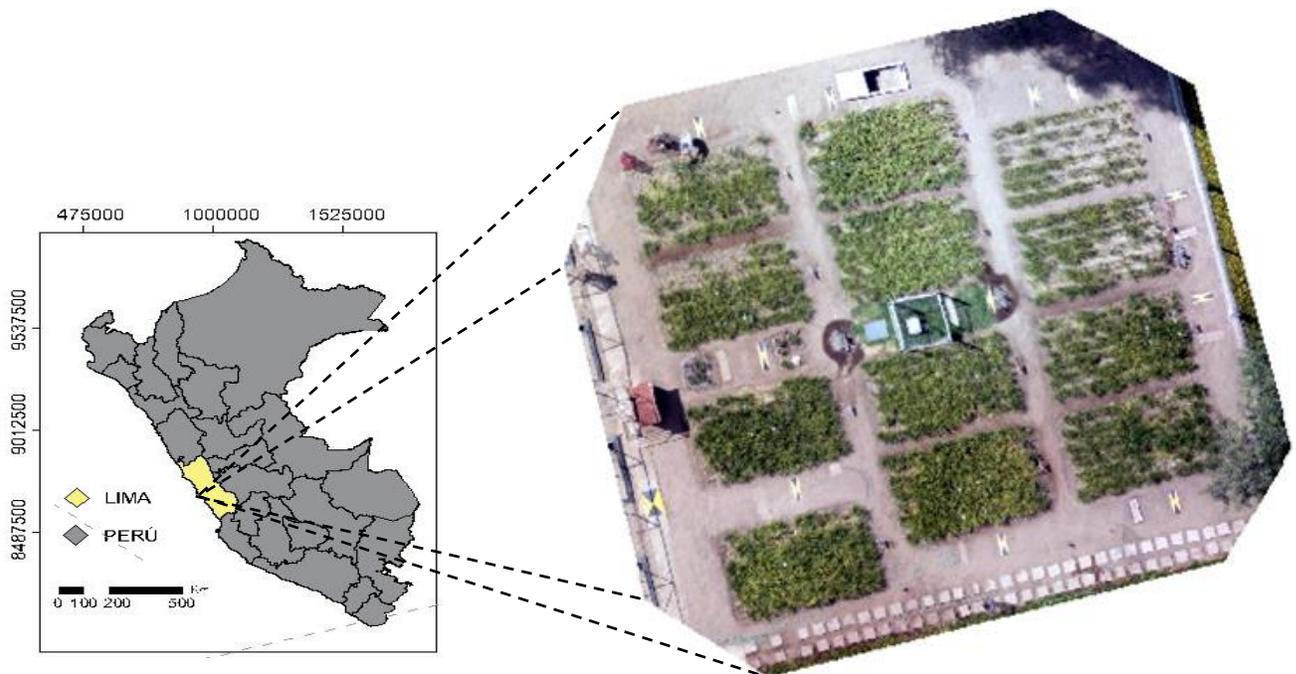


Figura 1. Ubicación del área experimental

Diseño experimental

El cultivo arroz fue la IR -71706, es un genotipo resistente al déficit de agua por lo que se puede cultivar en secano Heros et al. (2014). Además, el marco de plantación 20 cm x 10 cm y en áreas de 5 m x 3 m. El periodo abarco desde el 13 de noviembre del 2017 al 30 de abril del 2018, bajo un sistema de riego por goteo autocompensado de 3.75 l h⁻¹, a 25 cm entre gotero, 50 cm entre línea.

El diseño estadístico completamente al azar con tres tratamientos y tres repeticiones de estrés hídrico que corresponde a -10, -15 y -20kPa (T1, T2, T3) de tensión de humedad y un testigo (T0) a saturación. Los tratamientos se aplicaron entre macollamiento e inicio de primordio floral (77 a 105 días después de siembra) (Kukul et al. 2005). Además, se evaluó el crecimiento de la planta de arroz, recolectando los datos medidos por una cinta métrica en toda su etapa fenológica.

Procesamiento y adquisición de las imágenes.

Se utilizó un multi rotor VANT, modelo Matrice 210, equipado con una cámara multi-espectral (Parrot Sequoia) contiene los 4 sensores monocromáticos, verde (530 – 570 nm), rojo (640 – 680 nm), borde rojo(730 – 740 nm) e infrarrojo cercano(770 – 810 nm) y el Sensor “Sunshire”, capta la intensidad de la luz que irradia el sol en estas mismas 4 bandas espectrales. Ver figura 2.



a.



b.



c.

Figura 2. Equipo y materiales del experimento: a. dron (Matrice 210), b. cámara multiespectral (parrot sequoia) y punto de control.

Las 18 misiones de vuelo fueron realizadas mediante el software DJI GS Pro con una velocidad de 4.5 m/s, altura de 30 m, superposición frontal 85% y lateral 80%. Todos los vuelos se realizaron entre la 1:00 pm y 2:00 pm por la alta reflectancia en el día. Adquiriendo un dimensión del tamaño de pixel 3 cm, durante el periodo vegetativo comprendidos entre 04 de enero a 13 de abril de 2018.

Las imágenes multiespectrales fueron procesadas en el software Pix4D, se realizó la calibración radiométrica automática con la tarjeta AIRINOV del parrot sequoia. Además, realizó la calibración geométrica con siete puntos de control colocados con la estación RTK en el área de estudio ver figura 2. Para obtener ortomosaicos (índices de vegetación



(NDVI, SAVI y LAI)). Posteriormente se separó las plantas del suelo del ortomosaico visible mediante la clasificación supervisada con el software ArcGIS 10.1.

Estimación de índices de vegetación

Un índice de vegetación (I.V.) es una combinación de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad cambios en la vegetación y baja sensibilidad a otra información (atmósfera o suelo). La gran mayoría de los I.V. están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación viva y verde (Tucker, 1979)

El Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI), creado por Rouse et al. (1973), el cual como la mayoría de los índices de vegetación combina la banda roja y la infrarroja cercana y se basa en el contraste espectral que la vegetación sana presenta entre la banda del rojo. Otro de los índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). (Huete 1988), nace como la necesidad de disminuir las alteraciones presentadas en los valores del NDVI al realizar estudios en zonas áridas. Donde L es un parámetro que minimiza las perturbaciones causadas por el suelo. El autor recomienda un valor de 1 para zonas de vegetación escasa, 0.5 en zona de densidad media y 0.25 si la densidad de la vegetación es elevada. Además, es un variable para estimar el índices de vegetación es el índice de área foliar (LAI), es un número adimensional que representa la relación del área proyectada por las hojas respecto del área del suelo.ver cuadro 1.

Cuadro 1. Estimación de Índices de vegetación.

Nombre	Índice	Formula	Referencia
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	$\frac{IR - R}{IR + R}$	Rouse et al. (1974)
Índice de vegetación ajustado al suelo	SAVI	$\frac{(IR - R)}{(IR + R + L)} (L + 1)$	Huete (1988)
Índice de área foliar	LAI	$\frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91}$	Allen et al. (2002)

Análisis de datos

Se realizó el análisis estadístico del ANOVA y la Prueba de Tukey para la altura de planta y para los índices de vegetación (Al inicio de las secas, al final de las secas y en la cosecha). Además, se correlaciono la altura de planta con los índices de vegetación en las 18 fechas de evaluaciones en toda la etapa fenológica del cultivo de arroz.

Resultados y Discusión

Altura de la planta

Se analizó estadísticamente la altura de la planta en tres momentos: inicio del periodo de secas, al final del mismo y en la cosecha (75, 107 y 166 dds) (cuadro 2). Al inicio del periodo de secas las alturas son similares en los cuatro tratamientos con una diferencia de 10 por ciento entre los tratamientos T0 y T2, que después del periodo de secas la diferencia se ampliaría a un 16 por ciento. Entre los tratamientos extremos (T0 y T3), pasado el periodo de secas existe una diferencia de 20 por ciento que en el momento de la cosecha se reduciría a un 15 por ciento. Según el análisis estadístico de la varianza (Anova), se concluye que existe diferencias significativas entre los tratamientos, para un 0.05 del nivel de significancia en los tres momentos evaluados. Las diferencias significativas según la prueba de Tukey HSD se observan en la Figura 3.

Cuadro 2. Promedio de altura y desviación estándar (σ) en tres momentos del cultivo (antes del inicio de secas, después del periodo de secas y en la cosecha)

Tratamientos	Nº de plantas	Inicio de secas Promedio (cm)	σ	Momento de evaluación Final de secas Promedio (cm)	σ	Cosecha Promedio(cm)	σ
T0	51	51.5	5.8	75.1	6.6	82.2	7.5
T1	51	51.1	5.3	68	5.9	75.2	6.6
T2	51	46.1	7.8	63	7.8	73.2	6.5
T3	51	47.8	8.8	60.1	9.1	70.3	6.9

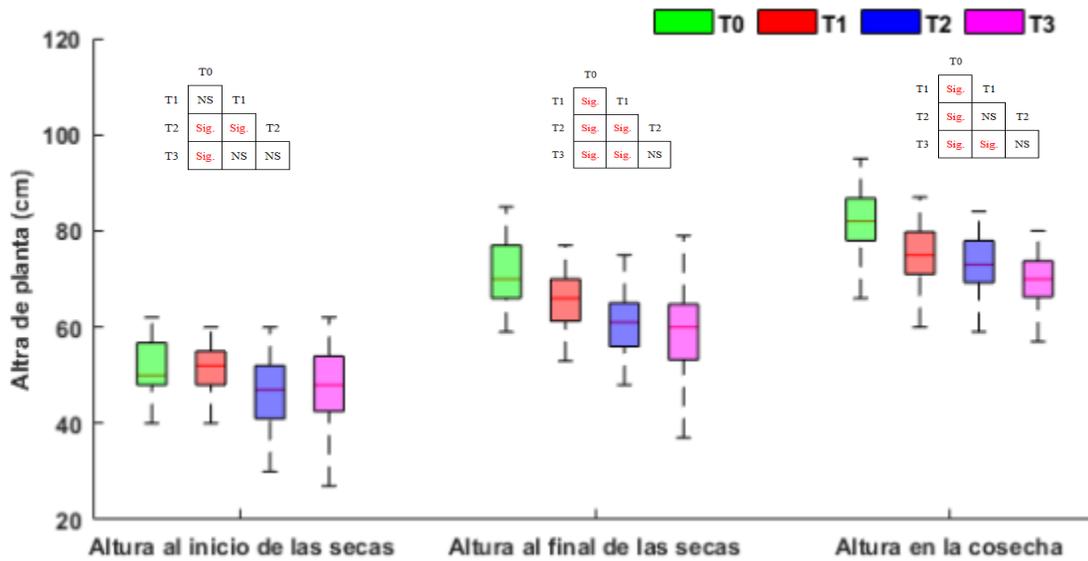


Figura 3. Boxplot del comportamiento de la altura (cm) en tres momentos (antes de secas, después de secas y en la cosecha)

Índices de vegetación

Índice de vegetación de diferencia normalizada

Se analizó estadísticamente del NDVI en tres momentos: inicio del periodo de secas, al final del mismo y en la cosecha (75, 107 y 166 dds) (cuadro 3). Al inicio del periodo de secas las alturas son similares en los cuatro tratamientos con una diferencia de 17 por ciento entre los tratamientos T0 y T3, que después del periodo de secas la diferencia se reduciría un 9 por ciento. En el momento de la cosecha el T1 y T0 se reduciría a un 6 por ciento. Según el análisis estadístico de la varianza (Anova), se concluye que existe diferencias significativas entre los tratamientos, para un 0.05 del nivel de significancia en los tres momentos evaluados. Las diferencias significativas según la prueba de Tukey HSD se observan en la Figura 4.

Cuadro 3. Promedio del LAI y desviación estándar (σ) en tres momentos del cultivo (antes del inicio de secas, después del periodo de secas y en la cosecha)

Tratamientos	Nº de píxeles	Inicio de secas Promedio (cm)	σ	Momento de evaluación Final de secas Promedio (cm)	σ	Cosecha Promedio(cm)	σ
T0	6963 \geq 40151	0.61	0.10	0.75	0.09	0.55	0.06
T1	6963 \geq 40151	0.54	0.10	0.73	0.10	0.59	0.07
T2	6963 \geq 40151	0.51	0.09	0.69	0.11	0.55	0.06
T3	6963 \geq 40151	0.50	0.09	0.68	0.11	0.57	0.07

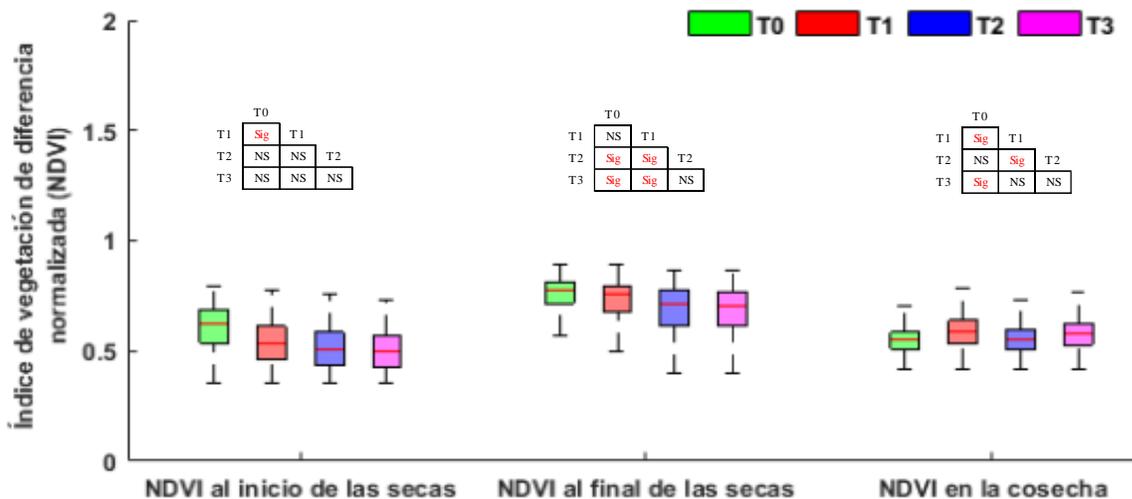


Figura 4. Boxplot del comportamiento del NDVI en tres momentos (antes de secas, después de secas y en la cosecha)

Índice de área foliar

Se analizó estadísticamente del LAI en tres momentos: inicio del periodo de secas, al final del mismo y en la cosecha (75, 107 y 166 dds) (cuadro 4). Al inicio del periodo de secas las alturas son similares en los cuatro tratamientos con una diferencia de 15 por ciento entre los tratamientos T0 y T3, que después del periodo de secas la diferencia se reduciría un 11 por ciento. En el momento de la cosecha el T1 y T0 se reduciría a un 7 por ciento. Según el análisis estadístico de la varianza (Anova), se concluye que existe diferencias significativas entre los tratamientos, para un 0.05 del nivel de significancia en los tres momentos evaluados. Las diferencias significativas según la prueba de Tukey HSD se observan en la Figura 5.

Cuadro 4. Promedio del LAI y desviación estándar (σ) en tres momentos del cultivo (antes del inicio de secas, después del periodo de secas y en la cosecha)

Tratamientos	Nº de pixeles	Inicio de secas Promedio (cm)	σ	Momento de evaluación Final de secas Promedio (cm)	σ	Cosecha Promedio(cm)	σ
T0	6963 \geq 40151	0.68	0.16	0.95	0.22	0.74	0.16
T1	6963 \geq 40151	0.61	0.14	0.91	0.19	0.80	0.20
T2	6963 \geq 40151	0.60	0.13	0.89	0.18	0.72	0.14
T3	6963 \geq 40151	0.58	0.11	0.84	0.14	0.77	0.16

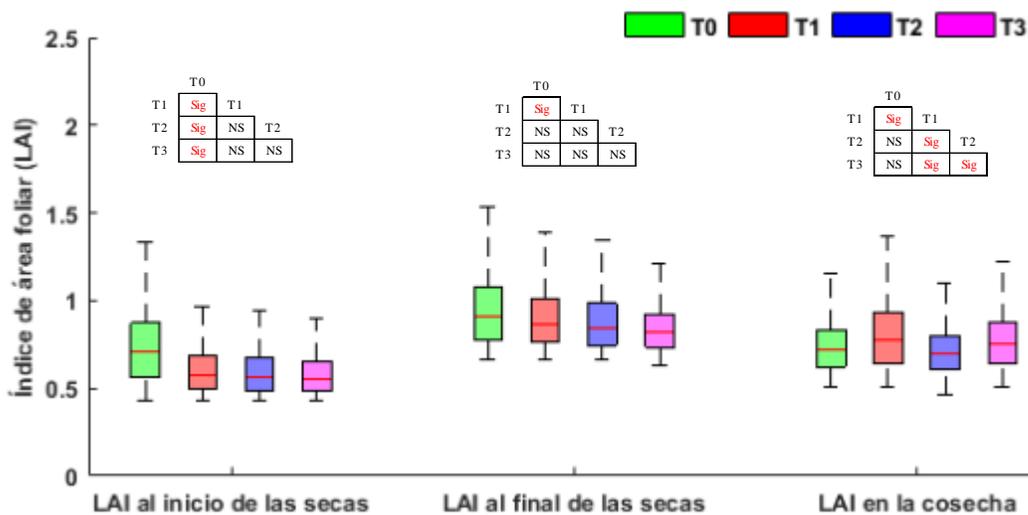


Figura 5. Boxplot del comportamiento del LAI en tres momentos (antes de secas, después de secas y en la cosecha)

Evaluación de la altura de planta e índices de vegetación

Se determino el coeficiente de determinación (r^2), para cada tratamiento y también para cada índice de vegetación en doce evaluaciones como se muestra en la Figura 6

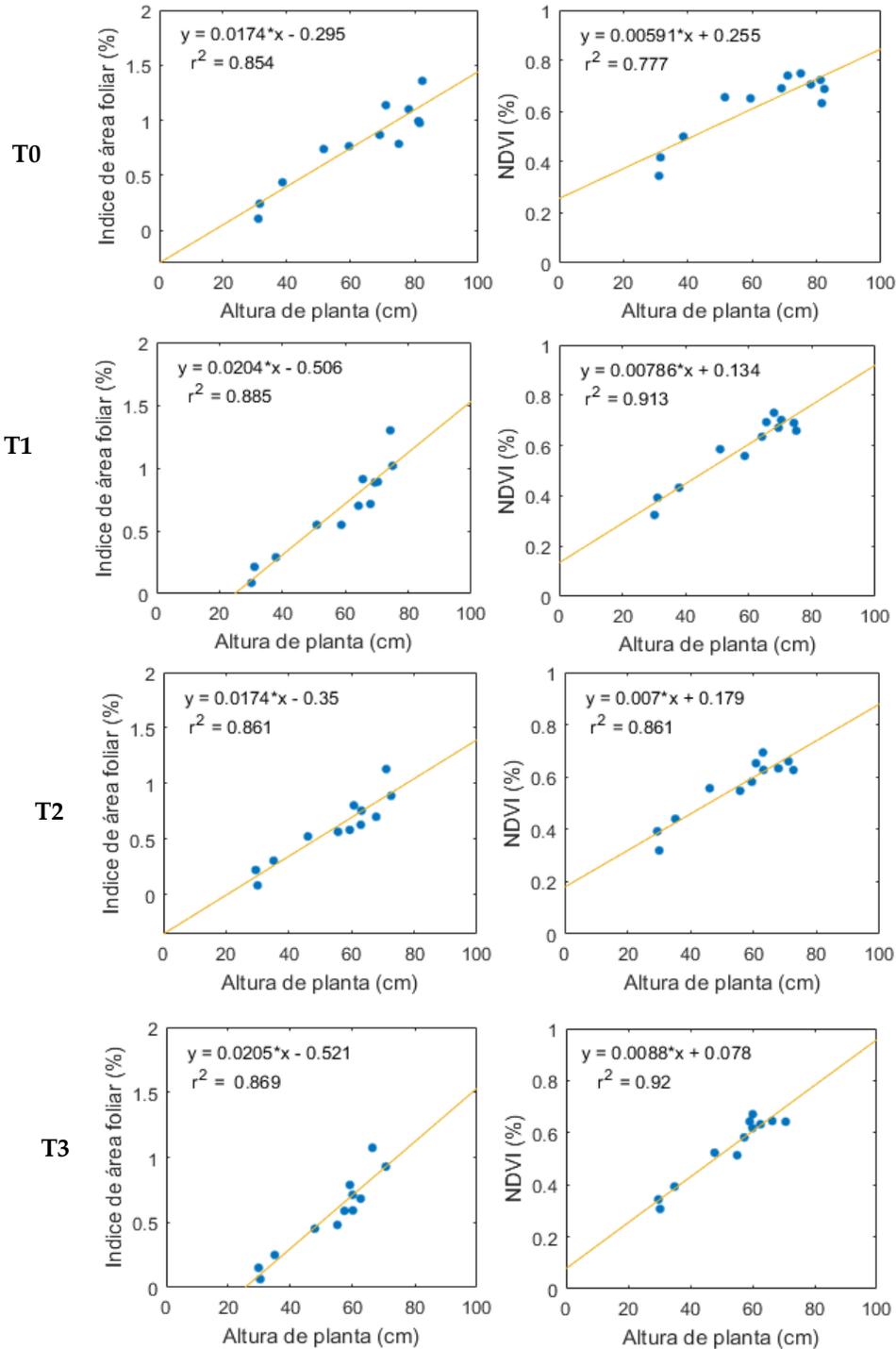


Figura 6. Coeficientes de correlación de la altura de la planta con respecto al índices de vegetación (Índice de área foliar (LAI) y Índice normalizado de vegetación (NDVI))



Se obtuvo como resultado entre la altura de planta con respecto a los índices de vegetación. El índice de área foliar LAI presentó un máximo y mínimo de 0.885 (T1) y 0.854 (T0); el índice normalizado de vegetación (NDVI), obtuvo un máximo y mínimo de 0.92 (T3) y de 0.77 (T0). Los índices de vegetación se relacionaron más estrechamente con la altura de planta. Según Nemeskéri y Helyes 2019, el estrés hídrico influye en el cambio de morfología y la anatomía de las plantas.

Conclusiones

La diferencia del potencial hídrico del suelo, proporciono un análisis de tres momentos en el cultivo (antes de secas, después de secas y en la cosecha) en la altura de planta, obteniendo una diferencia de 10, 20 y 15 por ciento entre tratamientos. Además, se obtuvo para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) una diferencia de 17, 9 y al final se redujo hasta en 6 por ciento, en cambio el índice de área foliar (LAI) se obtuvo una diferencia 15, 11 y al final se redujo hasta un 7 por ciento. Estos resultados muestran que el NDVI y LAI tiene la misma tendencia y diferente a la altura de la planta.

La relación de la altura de planta de arroz con respecto a los índices de vegetación con considerablemente aceptables, presentando una correlación entre $0.85 \geq R^2 \leq 0.89$ y $0.77 \geq R^2 \leq 0.95$ para el LAI y NDVI, con relación a la altura de planta de arroz. Este resultado demuestra la viabilidad del uso de índices de vegetación para la detección temprana el estrés hídrico en los cultivos.

Referencias Bibliográficas

- Allen, R; Tasumi, M; Trezza, R; Bastiaanssen, W; Waters, R. 2002. Manual for Surface Energy Balance Algorithms for Land. :1-98.
- Anderson, M.C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J.R., Kustas, W.P., 2011. Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *J. Clim.* 24, 2025–2044.
- Chaves M, J Pereira, J Maroco, M Rodrigues, C Ricardo, M Osório, I Carvalho, T Faria, C Pinheiro. 2002. How plants cope with water stress in the field. *Photosynthesis and growth. Annals of Botany* 89: 907-916.
- Cui, Z.L.; Zhang, H.Y.; Chen, X.; Zhang, C.; Ma, W.; Huang, C.; Zhang, W.; Mi, G.; Miao, Y.; Li, X.; et al. 2018 Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 555, 363–366.
- Dangwal, N., Patel, N., Kumari, M., Saha, S., 2015. Monitoring of water stress in wheat using multispectral indices derived from Landsat-TM. *Geocarto Int.* 1–12.
- Evanidi, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., Ferentinos, K.P., Kittas, C., 2017. Crop water assessment in controlled environment using crop reflectance and temperature measurements. *Precis. Agric.* 18, 332–349.



- Garik Gutman, G., 1990. Towards monitoring droughts from space. *J. Clim.* 3, 282–295.
- Huete, AR. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:295-309.
- Lloret, F., Lobo, A., Estevan, H., Maisongrande, P., Vayreda, J., Terradas, J., 2007. Woody plant richness and NDVI response to drought events in Catalanian (northeastern Spain) forests. *Ecology* 88, 2270–2279.
- Mänd, P., Hallik, L., Peñuelas, J., Nilson, T., Duce, P., Emmett, B.A., et al., 2010. Responses of the reflectance indices PRI and NDVI to experimental warming and drought European shrublands along a north-south climatic gradient. *Remote Sens. Environ.* 114, 626–636.
- Magney, T.S., Vierling, L.A., Eitel, J.U., Huggins, D.R., Garrity, S.R., 2016. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. *Rem. Sens. Environ.* 173, 84–97.
- Ministerio de Agricultura y Riego. Informe del arroz. Lima-Perú. 2017. Disponible en línea: <https://www.minagri.gob.pe/portal/analisis-economico/analisis-2017?download=11200:boletin-informe-de-arroz> (Consultado el 20 de enero de 2019)
- Otieno D, M Schmidt, S Adiku, J Tenhunen. 2005. Physiological and morphological responses to water stress in two Acacia species from contrasting habitats. *Tree Physiology* 25: 361-371.
- Panadiga, C., Rossini, M., Meroni, M., Cilia, C., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Cogliati, S., Picchi, V., Pinto, F., Marchesi, A., Colombo, R., 2014. Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. *Int. J. Appl. Earth Observation Geoinform.* 30, 167–178.
- Rhee, J.Y., Im, J.H., Carbone, G.J., 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 114, 2875–2887
- Rossini, M., Fava, F., Cogliati, S., Meroni, M., Marchesi, A., Panigada, C., Giardino, C., Busetto, L., Migliavacca, M., Amaducci, S., Colombo, R., 2013. Assessing canopy PRI from airborne imagery to map water stress in maize. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 86, 168–177.
- Rouse, JW; Hass, RH; Schell, JA; Deering, DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium* 1:309-317.
- Singh, R.P., Roy, S., Kogan, F., 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *Int. J. Remote Sens.* 24, 4393–4402
- Tucker, C.J., Choudhury, B.J., 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sens. Environ.* 23, 243–251.



- Wang, W., Wang, W.J., Li, J.S., Wu, H., Xu, C., Liu, T., 2010. The impact of sustained drought on vegetation ecosystem in Southwest China based on remote sensing. *Procedia Environ Sci* 2, 1679–1691.
- Yoshida, Y., Joiner, J., Tucker, C., Berry, J., Lee, J.-E., Walker, G., et al., 2015. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances. *Remote Sens. Environ.* 166, 163–177