

Sistemas de control para determinación del estrés hídrico de cultivos mediante imágenes térmicas basadas en drones.

Ing. Daniel Alejandro Martínez Castro, Dr. Francisco Eneldo López Monteagudo, Dr. Carlos Alberto Olvera Olvera, Dra. María Auxiliadora, Dr. Rafael Villela Varela, M. en I. Claudia Reyes Rivas,

Resumen—En la agricultura los sistemas de riego presentan muchos desafíos. Por lo general, el riego de cultivos se enfoca como una solución estandarizada simple, en otras palabras, un riego de manera uniforme. No obstante, se pueden lograr mejoras significativas que pueden tener un gran efecto en el rendimiento final del cultivo, dependiendo de las especies de cultivo tanto como de la topología del suelo, así mismo en la sustentabilidad del agua. Un riego inadecuado, excesivo o escaso, en las áreas incorrectas puede perjudicar la producción del mismo. Con el rápido crecimiento de los drones en la vida moderna, estos presentan una excelente oportunidad para monitorear los cultivos mediante la tecnología de captura de imágenes. Las imágenes térmicas son una herramienta muy precisa para evaluar el estrés hídrico en los cultivos. Por tanto, si las áreas con estrés hídrico pudieran ser detectadas en tiempo real los sistemas de riego ofrecerían un riego solo a aquellas zonas que lo necesitan. En este escrito, revisamos la aplicación de drones en el monitoreo del estrés hídrico en cultivos, así como el análisis del índice térmico de estrés hídrico CWSI y un trabajo futuro a realizar. Esto con el fin de ayudar a mejorar la comprensión acerca de las imágenes térmicas basadas en drones en la agricultura de precisión y las oportunidades que esto ofrece para mejorar la producción de los cultivos y una mayor sustentabilidad en los recursos hídricos empleados en el riego agrícola.

Palabras Claves— Estrés hídrico, índice de estrés hídrico (CWSI), riego, dron.

Introducción

La agricultura es uno de los mayores consumidores de agua, consume la mayor parte de los recursos hídricos en el mundo (70%) (Gilbert, 2012). También es importante señalar, que a nivel mundial el 45% del suministro mundial de alimentos se produce en tierras de riego que cubre solo el 18% de las áreas cultivadas (Döll and Siebert, 2002). Por ello, es que el riego inteligente es de crucial importancia. Ya que, un riego eficiente y efectivo no solo puede aumentar la productividad del cultivo sino también ayuda en la sustentabilidad del agua, por eso es altamente deseable una perspectiva más eficiente en el uso de la misma (Mo X. et al., 2005). En las distintas situaciones presentes en la agricultura existen diferentes áreas de cultivos que requieren diferentes niveles de agua, la eficiencia del agua se puede optimizar regando con precisión aquellos cultivos que están sometidos a estrés hídrico y así reduciendo el riego para dichas áreas sin la necesidad de sacrificar el rendimiento.

La temperatura del dosel del cultivo es un indicador esencial para medir el estrés hídrico y con ello los requerimientos de agua que son necesarios para cada área del cultivo. En el momento en que los cultivos están bajo un estrés hídrico los estomas de las hojas se cierran, para reducir la pérdida de humedad, y así impedir la transpiración (Guilioni L. et al., 2008). Esto conduce a un aumento en la temperatura de la hoja, ya que interrumpe la disipación de energía (Gontia and Tiwari, 2008). Por lo cual, se puede crear un índice de estrés hídrico (CWSI) basado en la temperatura del dosel que indique las condiciones en las que se encuentra el cultivo en términos hídricos.

Los métodos tradicionales para medir la temperatura del dosel suelen utilizar grandes cantidades de datos climáticos, así como la necesidad de tener acceso a ellos (Meinke and Stone, 1997), por lo que consumen mucho tiempo y económicamente requieren mucha mano de obra. Estos métodos suelen utilizar a muchos técnicos de campo con termómetros infrarrojos de mano, o haciendo uso de la observación visual, quienes acostumbran atravesar los campos para recolectar datos (Ray D. Jackson., 1983). Esto podría ser viable para cultivos pequeños o jardines, pero para cultivos a gran escala esto es inadecuado. Asimismo, estos métodos carecen de un alto grado de precisión ya que los datos suelen ser recolectados solo de un subconjunto del área del cultivo, y las condiciones de estrés hídrico pueden ser diferentes para cada área. Los métodos tradicionales basados en tierra, a veces, son poco prácticos cuando se aplican a toda el área de cultivo.

Por lo que es importante diseñar un sistema automatizado para la recolección de datos de la temperatura del dosel del cultivo. Se sabe que la disponibilidad de imágenes térmicas de alta resolución fue limitada debido a los altos costos de adquisición. Sin embargo, en los últimos años los desarrollos recientes de los drones posibilitan las imágenes térmicas con altas resoluciones espaciales y temporales a bajos costos. Este sistema se basa en la utilización de un dron equipado con una cámara térmica para capturar imágenes de toda el área del cultivo. Después de adquirir las imágenes térmicas, estas deben ser procesadas para crear mapas con un índice de estrés hídrico del cultivo, y así identificar los cultivos bajo estrés

hídrico. Este enfoque permitirá mapear el estado hídrico de la planta o, en una escala mayor, del cultivo teniendo en cuenta la variabilidad que existe naturalmente o inducida artificialmente.

A. Drones aplicados a la agricultura de precisión

Los drones principalmente han sido utilizados para fines militares, pero recientemente, la agricultura ha desarrollado un gran interés en ellos. Existen diversos trabajos realizados sobre este tema, por ejemplo, los trabajos pioneros de Herwitz et al. (2002a, 2002b, 2004) donde describen la utilidad de los drones para la detección de fertilización, anomalías de riego y maduración de los frutos, todos ellos en campos agrícolas. De igual manera, la NASA ha financiado muchos de estos trabajos como el RCATS/APV-3, el cual ha sido utilizado para el estudio de viñedos en California (Johnson et al., 2003). Otro ejemplo sería el de Pathfinder-Plus, quien cuenta con una alimentación solar para la capacidad de vuelo de varias horas, también cuenta con cámaras tanto visibles como multiespectrales para la adquisición de imágenes y estudio de un cultivo de café en Hawaii. En la última década, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de drones cada vez más pequeños, esto principalmente se debe a la reducción de peso y tamaño de los sensores, los cuales cada vez son más precisos, de igual manera suelen incorporar GPS para el modo auto-piloto (Berni et al., 2009a; Turner et al., 2012).

Primordialmente se emplean dos tipos de drones para el estudio y gestión agrícola: aviones de ala fija y helicópteros (Sugiura et al., 2005; Berni et al., 2009a, 2009b). Cada plataforma aérea tiene sus ventajas y limitaciones. En el caso de los drones de tipo helicóptero, estos tienen un sistema de vuelo mucho más complejo, pueden viajar prácticamente en cualquier dirección, su despegue y aterrizaje son prácticos y no necesitan de plataformas especiales para ello, lo cual es más efectivo en los campos agrícolas. Sin embargo, sus limitaciones son altitudes y capacidades de vuelo más bajas.

Por otro parte, los drones de tipo ala fija son sistemas de vuelo más simples y por ende contemplan una mayor duración de vuelo, esto implica la ventaja de cubrir áreas más amplias. A pesar de ello, esto comprende una limitación en la reducción de la resolución de imágenes, ya que estos drones vuelan a altitudes mucho mayores. Otras limitaciones que tienen este tipo de drones es el no poder flotar, mantener el equilibrio y la estabilidad en un punto, y también requieren de plataformas específicas para el despegue y aterrizaje.

En la actualidad, existe otro tipo de drones, los multi-helicópteros los cuales tienen características muy similares al tipo helicópteros (Turner et al., 2012; Primicerio et al., 2012). Estos principalmente se diseñaron para la toma de imágenes y video aéreo, ya que cuentan con una gran estabilidad y facilidad al momento de maniobrarlos. Este tipo de drones ha presentado una mayor facilidad de uso en comparación a los tipos de drones mencionados anteriormente, por lo que cada vez más usuarios los utilizan para aplicaciones tanto profesionales como no profesionales. Con el paso del tiempo, sus precios se van reduciendo y con ello se abre una gran oportunidad para los agricultores, ya que estos tipos de drones podrían ser operados por los mismos para el diagnóstico de cultivos y obtener resultados casi de inmediato. Cabe mencionar, que este tipo de drones admite considerables cargas útiles, no obstante, su tiempo de vuelo se reduce considerablemente a unos cuantos minutos, 5-10 min, por lo que es posible que se requieran múltiples vuelos para cubrir áreas amplias o por otro lado el uso de más baterías portátiles. Por tanto, el tipo de dron a utilizar dependerá del objeto a estudiar.

Actualmente, los diferentes tipos de drones presentan ventajas y limitaciones diferentes. No obstante, esta tecnología podría revolucionar la agricultura en términos de temporalidad y espacialidad, en cultivos, a corta distancia en comparación con los métodos tradicionales, como lo son, imágenes satelitales y vuelos tripulados, los cuales se limitan en condiciones climáticas, tiempos de visita y altos costos, entre otros (Turner et al., 2012).

B. Índice CWSI (Crop Water Wtress) e imágenes térmicas

La adquisición y formación de imágenes de cultivos extensos mediante la utilización de cámaras térmicas es una herramienta de información muy útil en la determinación del estado hídrico, ya que estas nos permiten calcular la temperatura del dosel, la cual está relacionada con la transpiración de la planta. Actualmente, los sensores térmicos de alta resolución utilizados en los drones son de mayor rendimiento en términos de menor tamaño y peso, y de mayor resolución tanto espectral como espacial, alcanzando imágenes térmicas con una resolución de centímetro, lo cual nos proporciona una gran precisión para la extracción de la temperatura del dosel en cultivos discontinuos o árboles, y nos posibilita una potencial herramienta para la programación del riego.

Los principales indicadores del estrés hídrico en plantas son la estimación de la conductancia estomática (g_s) y el potencial hídrico foliar (ψ) (Medrano et al., 2002; González-Dugo et al., 2013), esto se debe a que la sequía estimula el cierre estomático reduciendo la transpiración y el enfriamiento por evaporación, dando lugar al aumento de

temperatura en las hojas de los cultivos. El índice de estrés hídrico en los cultivos CWSI, propuesto por Jackson y sus colaboradores (Jackson et al., 1981), se desarrolló en los 80s como indicador del estado del agua del cultivo. Este índice es el más utilizado para cuantificar el estrés hídrico en cultivos en base a la temperatura de la superficie del dosel. Presenta una estimación del estado hídrico de los cultivos respecto a los niveles mínimos y máximos de estrés que pueden ocurrir debido a la disponibilidad o falta de agua, respectivamente. EL CWSI varía de 0 a 1 (Idso et al., 1981), relacionando los valores cercanos a 1 con altos niveles de estrés, teniendo en cuenta las temperaturas de la superficie en condiciones húmedas y secas, como se muestra en la siguiente formula, sugerida por Jones (1992):

$$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (1)$$

donde T_{canopy} es la temperatura de la superficie del dosel y T_{wet} y T_{dry} son superficies de referencia que están completamente húmedas y secas, respectivamente, para simular una transpiración de las hojas tanto máxima como mínima en las condiciones ambientales en las que se encuentran. Los estudios que se han realizado para la estimación del CWSI han utilizado mediciones térmicas adquiridas de diversas fuentes, incluyendo los termómetros infrarrojos, sensores adaptados en un mástil o grúa, en aeronaves tripuladas o imágenes adquiridas desde satélites, esto con el fin de explorar el uso de las imágenes térmicas como una herramienta para distinguir diferentes tratamientos de estrés hídrico. Por lo general la experimentación incluye cultivos que reciben dos tratamientos de riego: sin riego y riego completo. Estos estudios han demostrado que la superficie del dosel en cultivos sin riego muestra significativamente una temperatura mayor que los cultivos con riego.

En varias campañas de vuelo el CWSI ha mostrado una clara correlación con g_s , para la mayoría de los cultivos estudiados, como las aceitunas, vides, almendras, melocotones y albaricoques (Berni et al., 2009a; GonzálezDugo et al., 2013). Mientras tanto, no se observaron correlaciones con cultivos cítricos, como cultivos de naranja y limones (GonzálezDugo et al., 2013).

C. Trabajo futuro

En esta sección trataremos de describir, de una manera teórica, los materiales y métodos que se utilizaran en el trabajo futuro de investigación, en el cual se propone realizar un sistema de control para la determinación del estrés hídrico en cultivos de tomate mediante imágenes térmicas basadas en un dron a través de la estimación de CWSI.

C.1. Caracterización del sitio de estudio

Se investigará algunos parámetros que caracterizan al cultivo de estudio, como lo son:

- La etapa de maduración del cultivo en la que se quiere realizar el estudio, esto depende de la fecha en que se va a realizar.
- El tamaño total del huerto, así como el tamaño de las hileras y la separación existente entre sí.
- Las dimensiones del dosel, tanto anchura como altura.

Por otro parte, se propone aplicar dos tratamientos de riego; control y deficitario. En consecuencia, es importante hacer una división igualitaria en parcelas para los diferentes tipos de tratamientos. La irrigación se realizará manualmente a través de riego por goteo, para tener un mejor control del agua. Las parcelas con el tratamiento de control se regarán a diario para satisfacer el requerimiento de agua del cultivo mientras que las parcelas con tratamiento deficitario tendrán retención del riego unos días antes de la adquisición de datos de campo y basados con el dron.

C.2. Adquisición de datos de campo

Para la adquisición de datos de campo se propone utilizar métodos tradicionales para determinar el estrés hídrico del cultivo y así poder hacer la relación con CWSI. Para la medición del potencial hídrico foliar (Ψ) se utilizara una cámara de precisión y para la medición de la conductancia estomática (g_s) se utilizara un porómetro de hoja, ambas mediciones se realizaran al mismo tiempo que la adquisición de imágenes basadas en dron, en condiciones de radiación homogénea, con cielo despejado y sin aire.

C.3. Dron y equipamiento

Se investiga las especificaciones tanto del dron como de la cámara térmica que se utilizarán en la investigación, como son; el tipo de dron y su carga útil, el rango espectral, distancia focal, campo de visión y resolución de la cama

térmica. También es importante investigar el microcontrolador que se utilizara para la compatibilidad y la comunicación entre ambos equipos para el almacenamiento y la adquisición de las imágenes. Por otro lado, se investigará los métodos de calibración radiométrica para elaborar algoritmos de calibración radiométrica para la cámara térmica.

C.4. Adquisición de imágenes térmicas basadas en dron

Para la adquisición de las imágenes térmicas se propondrán días y horarios en los cuales el sol se encuentre despejado y sin viento. También hay que proponer la distancia de vuelo sobre el nivel del suelo para obtener una resolución de imagen adecuada, así mismo, ajustar la velocidad del vuelo y la frecuencia en la cual se realizara el disparo automático para la captura de imagen y así determinar el tiempo de vuelo, o de ser necesario vuelos consecutivos. De igual manera, hay que proponer los puntos de control, en los cuales se tomara la imagen, que mejor se adecuen tanto para la resolución espacial de la imagen como para la visibilidad de la cámara térmica.

C.5. Procesamiento de imágenes térmicas

Para el procesamiento de imágenes se propone realizar un algoritmo en Matlab el cual convierta la imagen térmica en un mapa de índice de estrés hídrico (CWSI). Basado en la recuperación de temperaturas precisas de los datos de señal de las imágenes térmicas, como son los valores de temperatura de agua, suelo y vegetación, Por otro lado, es necesario un software para realizar el procesamiento fotogramétrico de la triangulación y el ortomosaico de imágenes aéreas.

C.6. Análisis

Se pretende hacer una relación entre el CWSI y los datos medidos con los métodos tradicionales para demostrar que el CWSI estimado mediante imágenes térmicas desde un dron se puede usar para evaluar la variabilidad espacial del estrés hídrico en cultivos.

II. CONCLUSIONES

Las imágenes térmicas basadas en drones tienen un gran potencial para la generación de mapas CWSI, siendo este uno de los mejores indicadores del estrés hídrico en cultivos. Si bien los indicadores basados en la fisiología se pueden medir en un número limitado de plantas, ya que suele ser un trabajo laborioso, las imágenes térmicas basadas en drones proporcionan información para cultivos extensos. De este modo, se convierten en una herramienta valiosa para mapear la variabilidad espacial del estrés hídrico en un tiempo de repuesta corto, lo cual es crítico para las aplicaciones en tiempo real requeridas en la agricultura, y detectar problemas potenciales en el sistema de riego o podrían proporcionar información útil para la programación de riego.

III. REFERENCIAS

- [1] Gilbert, N., 2012. Water under pressure. *Nature* 483, 256–257.
- [2] Döll, P., Siebert, S., 2002. Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resour. Res.* 38 (4), <http://dx.doi.org/10.1029/2001WR000355>, 8-1-8-10.
- [3] Herwitz, S.R., Leung, J.G., Higgins, R.G., Dunagan, S.E., Arvesen, J.C., 2002a. Remote command-and control of imaging payloads using commercial off-the-shelf technology. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, IEEE, Toronto, <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026755>.
- [4] Herwitz, S.R., Johnson, L.F., Arvesen, J.C., Leung, J.G., Dunagan, S.E., 2002b. Precision agriculture as a commercial application for solar-powered unmanned aerial vehicles. In: Reston, V.A., Johnson, L.F., Bosch, D.F., Williams, D.C., Lobitz, B.M. (Eds.), AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerial Vehicles. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. (Paper 2002-3404).
- [5] Herwitz, S.R., Johnson, L.F., Dunagan, S.E., Higgins, R.G., Sullivan, D.V., Zheng, J., Lobitz, B.M., Leunge, J.G., Gallmeyer, B.A., Aoyagi, M., Slye, R.E., Brass, J.A., 2004. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Comput. Electron. Agric.* 44 (1), 49–61.
- [6] Johnson, L.F., Herwitz, S., Dunagan, S., Lobitz, B., Sullivan, D., Sly, R., 2003. Collection of ultra-high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. In: Proceedings, Int'l Symposium on Remote Sensing of Environment, Honolulu, HI, November 10–14.
- [7] Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., Villalobos, F., 2009a. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sens. Environ.* 113 (11), 2380–2388.

- [8] Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., Fereres, E., 2009b. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 47 (3), 722–738, <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>.
- [9] Turner, D., Lucieer, A., Watson, C., 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sens.* 4 (5), 1392–1410, <http://dx.doi.org/10.3390/rs4051392>.
- [10] Sugiura, R., Noguchi, N., Ishii, K., 2005. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosys. Eng.* 90 (4), 369–379.
- [11] Primicerio, J., Di Gennaro, S.F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., Vaccari, F.P., 2012. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precis. Agric.* 13 (4), 517–523.
- [12] Medrano, H., Escalona, J.M., Bota, J., Gulías, J., Flexas, J., 2002. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter. *Ann. Bot. Lond.* 89 (7), 895–905.
- [13] González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P.A., Alarcón, J.J., Intrigliolo, D.S., Fereres, E., 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precis. Agric.* 14 (6), 660–678.
- [14] Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24, 45–55.
- [15] Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J. and Pinter, P. J., Jr. (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator Wheat. *Water Resources Research (USA)*.
- [16] Mo X., Liu S., Lin Z., Xu Y., Xiang Y., and McVicar T.R. 2005. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183, 2 (April 2005), 301–322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.032>.
- [17] Guillioni L., Jones H.G., Leinonen I., and Lhomme J.P. 2008. On the relationships between stomatal resistance and leaf temperatures in thermography. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 11 (July 2008), 1908–1912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066016>.
- [18] Gontia N.K. and Tiwari K.N. 2008. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. *Agricultural water management* 95, 10 (July 2008), 1908–1912. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.017>.
- [19] Meinke H. and Stone R.C. 1997. On tactical crop management using seasonal climate forecasts and simulation modelling: a case study for wheat. *Scientia Agricola* 54 (June 1997), 121–129. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161997000300014>.
- [20] Ray D. Jackson. 1983. Assessing moisture stress in wheat with hand-held radiometers. *International Society for Optics and Photonics* 0356 (June 1983), 121–129. <https://doi.org/10.1117/12.934042>.

IV. BIOGRAFÍA

Daniel Alejandro Martínez Castro, Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones, estudiante de la Maestría en Ciencias perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Francisco Eneldo López Monteagudo Graduado de Ingeniero Electricista en 1981, Doctor en Ciencias Técnicas en 1999, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. Profesor titular de la Universidad Central de las Villas Cuba desde 1981 hasta el 2009. Actualmente es profesor-investigador de la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. eneldolm@yahoo.com

Carlos Alberto Olvera Olvera, Doctor en Ciencias, Profesor Titular de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

María Auxiliadora Araiza Esquivel, Doctora en Ciencias, Profesora Titular de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Rafael Villela Varela, Doctor en Educación y profesor del Cuerpo Académico “Sistemas de Control y Comunicaciones”, perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Claudia Reyes Rivas, Maestra en ingeniería con especialidad en control y profesora del Cuerpo Académico “Sistemas de Control y Comunicaciones”, perteneciente a la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica y Comunicaciones, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.