Quinto Congreso Nacional de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019
Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa
AURPAES, S.C.

Artículo: COMEII-19048
Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de septiembre de 2019

SENSORES ESPECTRALES Y LA DETERMINACIÓN DE PRONÓSTICOS DE RENDIMIENTOS

Victor Manuel Gordillo Salinas[1*]; Alondra Villeda Monsalvo[2]; Leonardo Tijerina Chávez[3]

[1]Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

manuel_gordillo@tlaloc.imta.mx - 777 3 29 36 00 ext. 864 (*Autor de correspondencia)

[2]Certimex Agro S.C., Francisco Goitia No. 8, Colonia Emiliano Zapata, Texcoco, Edo. de Mex. 56227, México.
[3]Hidrociencias. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo Carretera México-Texcoco, Km. 36.5 Montecillo, Texcoco, Edo. de Mex. C.P. 56230, México.

Resumen

Entre los métodos disponibles para la estimación del rendimiento de un cultivo, los sensores espectrales son una alternativa viable no destructiva. Existen dispositivos que registran datos espectrales a nivel de hoja, cercanos al dosel de la planta y remotamente, los datos registrados desde estos dispositivos han sido usados como estimadores indirectos de variables agronómicas. Actualmente es posible obtener imágenes espectrales de sensores montados en vehículos aéreos no tripulados (VANTs), logrando datos de alta resolución temporal y espacial.

En el presente estudio se estableció un cultivo de trigo con 7 tratamientos de nitrógeno(N) para evaluar el rendimiento de cada una de estos, las dosis aplicadas variaron desde 0 hasta 18 g/m^2. Se tomaron lecturas en 2 etapas fenológicas, cercanas a floración, del cultivo de trigo, con el sensor GreenSeeker, el Spad 502+ e imágenes con una cámara canon s110 modificada con un filtro infrarrojo cercano (NIR). Las lecturas tomadas por cada sensor y los índices de vegetación (IV) derivados de las imágenes multiespectrales se compararon con el rendimiento de cada tratamiento. El GreenSeeker es el que mejor explica a la variable rendimiento en la etapa fenológica más temprana presentando un R^2 de 0.7363, mientras que, en la otra etapa fenológica, el índice de vegetación de diferencias normalizadas verde (GNDVI, por sus siglas en inglés) fue el que tuvo mejor desempeño con un R^2 de 0.7871. Los resultados indican que los sensores espectrales son capaces de determinar la variabilidad del rendimiento en etapas medias del cultivo del trigo.

Palabras claves: vehículo aéreo no tripulado, etapa fenológica, índices de vegetación.

Introducción

Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), está estipulado el denominado: "Hambre cero", el cual tiene como objetivo principal que *"Para 2030, terminar con el hambre y garantizar el acceso de todas las personas, en particular los pobres y las personas en situaciones vulnerables, incluidos los bebés, a alimentos seguros, nutritivos y suficientes durante todo el año"* (FAO, consulta 2-09-2019).

"La producción agrícola tendrá que aumentar aproximadamente un 50% en 2050 para satisfacer las necesidades de una población creciente" (FAO, consulta 2-09-2019), bajo esta premisa es imperativo, para obtener éxito en las ODS, el desarrollo de técnicas y herramientas que ayuden en el monitoreo, revisión y seguimiento de las acciones que se implementen en la producción de alimentos.

Un factor clave para satisfacer la demanda de alimentos, es el seguimiento y pronóstico del rendimiento de los cultivos, este conocimiento servirá como un indicador del funcionamiento de las acciones realizadas por los tomadores de decisiones.

El uso de técnicas no destructivas que puedan pronosticar el rendimiento de un cultivo de una manera confiable y eficiente, buscando reducir el tiempo y los costos económicos que se generan en la estimación de esta variable de manera convencional. El creciente número de sensores disponibles, junto con la gran diversidad de tecnologías de sensores, por ejemplo, sensores de imágenes, sensores ópticos multiespectrales e hiperespectrales, fluorómetros, etc., ha aumentado la posibilidad de integrar estos sistemas de sensores en la operación agrícola diaria. Cada sensor tiene ventajas y desventajas, y puede proporcionar información importante sobre el estado del campo, que coadyuve al final del ciclo en la obtención de mayores rendimientos y mejor calidad de cosechas.

Los principios básicos de la reflectancia de las hojas y del dosel de las plantas se han incorporado a los índices vegetativos que relacionan combinaciones de bandas de ondas específicas con diversas características de la planta. Numerosos procedimientos de estimación de producción o rendimiento, combinados con datos de sensores remotos, se han estudiado como un tema importante de investigación, incluidos los modelos físicos y estadísticos.

Conforme el desarrollo de la tecnología ha ido en aumento, las técnicas de adquisición de datos espectrales de los cultivos han sido cada vez más comunes, estas técnicas tienen la gran ventaja de que son metodologías no destructivas.

Varios sensores espectrales se han usado en la agricultura para captura de información espectral, estos sensores han sido calibrados y validados con datos observados de campo. El SPAD 502+ ((Minolta Ltd, Osaka, Japón), es un medidor de clorofila de mano

que se usa ampliamente en la sincronización del suministro de N con la demanda real de cultivos, Monostori et al. (2015), evaluó lecturas de SPAD con el rendimiento de grano del trigo de invierno, encontrando una fuerte correlación positiva entre las dos variables, Wu et al. (2017) demostró que la biomasa tuvo relaciones positivas significativas con el rendimiento de grano, la tasa fotosintética del dosel, lecturas del SPAD y la eficiencia de la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, siglas en inglés).

El GreenSeeker (Trimble, Sunnyvale, CA), usa fuentes de luz y detectores activos rojos NDVI y NIR para registrar las lecturas, Bu et al. (2017) Realizo un experimento para predecir usando imágenes satelitales y los comparó con las predicciones desde sensores ópticos activos como: GreenSeeker (GS) y Crop Circle (CC) , concluyeron que los datos del GS, CC e imágenes satelitales se relacionaron con el rendimiento de los cultivos, lo cual coincide con otros estudios realizados (Caturegli et al. 2015; Genc et al., 2009; Bausch and Khosla , 2010), de igual manera concluyen que debido al problema de adquirir las imágenes de satélite lo suficientemente temprano en la temporada para ser útil como una herramienta de detección, proponen que una mejor opción sería montar un sensor óptico activo en un implemento agrícola para una actividad temprana o explorar el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT).

Recientemente, se inició la aplicación innovadora de vehículos aéreos no tripulados (UAV) de ala fija y / o rotatoria para el muestreo espacial o mapeo preliminar para operaciones de tasa variable, ya que las imágenes de UAV se pueden adquirir de forma más económica, con excelente maniobrabilidad además de aumentar la resolución espacial y con mayor seguridad en comparación con las aeronaves tripuladas (Du y Noboru, 2016; Eisenbeiss, 2004 y UAVWRJ, 2016). Rasmussen et al. (2016) investigó la confiabilidad de cuatro índices de vegetación diferentes derivados de cámaras de grado de consumo en el rango del visible, así como una cámara infrarroja montada en vehículos aéreos no tripulados para evaluar parcelas experimentales, y concluyó que los índices de vegetación de imágenes de UAV tienen la misma capacidad que los registros terrestres para cuantificar las respuestas de los cultivos a los tratamientos experimentales, aunque se deben tener en cuenta deficiencias tales como las variaciones angulares en la reflectancia, el mosaico de las imágenes y la fluctuación de la luz ambiental.

El objetivo del presente trabajo es determinar si los valores espectrales desde distintas fuentes de adquisición, son capaces de estimar de manera confiable los pronósticos de rendimiento de un cultivo.

Materiales y Métodos

Sitio del experimento

El experimento se estableció en un campo experimental dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, con coordenadas geográficas: Latitud 19.46° Norte y longitud 98.90°Oeste y tiene una altitud aproximada de 2,250 metros sobre el nivel medio del mar, este sitio tiene un clima templado con lluvias en verano y época seca en invierno [(Cwo)(w)b(i')(g), García, 1981], la temperatura promedio anual es de 15.2 °C y 650 mm de precipitación anual.

Diseño del experimento

Se estableció un cultivo de trigo, a una densidad de semilla de 100 kg/ha, el riego se suministró mediante un sistema de goteo, el control de plagas y enfermedades con base en prácticas convencionales de la zona.

El diseño experimental fue bloques completamente al azar con 7 tratamientos de nitrógeno y 4 repeticiones, los tratamientos se dividieron en dos etapas, la primera fue realizada a la siembra y la segunda en la etapa fenológica del trigo, denominada: final de elongación de tallo.

Datos de campo

Los datos de campo capturados con los tres distintos sensores fueron hechos en dos etapas fenológicas cercanas a floración (vaina engrosada y espigado).

Se tomaron 9 lecturas de manera uniforme, tres en un extremo, tres al centro y tres al otro extremo (Figura 1), con los sensores GS y SPAD 502+, sobre las 28 unidades experimentales para cada fecha de muestreo, la media aritmética fue el valor representativo de cada unidad experimental.

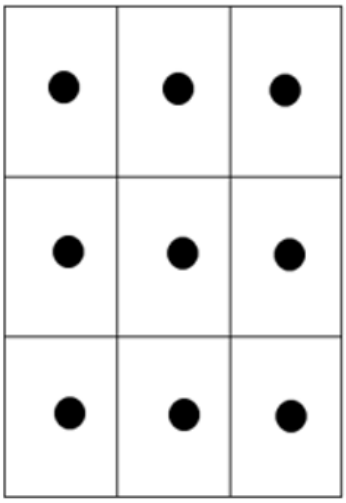

Figura 1. Muestreo para la toma de lecturas en cada unidad experimental, para el sensor GS y el SPAD 502+.

La toma de lecturas con el SPAD 502+, fue hecha a nivel de hoja (Figura 2), este dispositivo mide la cantidad de clorofila a nivel de hoja. El contenido de clorofila está relacionado con la condición de la planta y del cual se puede deducir si es necesario una fertilización adicional, optimizando los requerimientos de las necesidades las plantas se puede lograr un mayor rendimiento y una cosecha de mayor calidad.

Figura 2. Medición con sensor SPAD 502+ a nivel de hoja (Fuente: Konica Minolta Sensing, 2009)

El GreenSeeker toma lecturas a nivel de dosel (Figura 3), el dispositivo fue colocada a un metro por encima de la planta, este es considerado un sensor activo ya que emite su propia luz y no es necesario la reflexión de la luz del sol.

Figura 3. Toma de lecturas con el sensor GS (Fuente: Blog cornell.edu, 2014)

En relación a la toma de datos espectrales aéreos, esta fue hecha mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado (multirotor), al cual se le montó un sensor infrarrojo cercano. El sensor infrarrojo cercano captura información del espectro electromagnético en las longitudes de onda (Cuadro 1):

Cuadro 1. Datos de la longitud de onda de las bandas del sensor

Banda	Pico de la longitud de onda
Banda 1 (Azul)	460 nm
Banda 2 (Verde)	525 nm
Banda 3 (IInfrarrojo cercano)	710 nm

Con información capturada por las imágenes de alta resolución del dron, se derivaron dos índices de vegetación: el índice de vegetación de diferencias normalizadas verde (GNVDI, por sus siglas en inglés) y el índice de vegetación de diferencias normalizadas azul (BNDVI, por sus siglas en inglés), las bandas involucradas en cada uno de estos índices se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Índices de vegetación y las bandas espectrales involucradas.

Indice de vegetación	Relación
GNDVI	$\frac{Infrarrojo\ cercano - verde}{infrarrojo\ cercano + verde}$
BNDVI	$\frac{Infrarrojo\ cercano - Azul}{Infrarrojo\ cercano + Azul}$

El Rendimiento de grano se midió mediante un muestreo, que consistió en determinar la cantidad de grano se tenía con base en un marco de referencia con dimensiones de 0.50 x0.50 m, el cual fue lanzado de manera aleatoria en cada unidad experimental y las plantas que quedaron dentro de dicho marco fueron cosechadas para determinar el pesó del grano, con cual se obtuvo la unidad de peso con respecto al área de muestreo.

Procesamiento de las imágenes

Las imágenes obtenidas con la cámara fueron procesadas en el software PIX4Dmapper, este software es una herramienta especializada en el procesamiento de imágenes, con lo cual fue posible obtener los mapas de reflectancia de cada canal del sensor, este software además ofrece como entregables una nube puntos, un ortomosaico y un modelo digital de superficie.

Debido a que dentro del ortomosaico se presentan distintos objetos captados al momento del barrido con el sensor y el VANT, es necesario segregar la información, por tal motivo se usó una clasificación, con ayuda del software eCognition, el cual tiene la particularidad de que trabaja con algoritmos de clasificación orientada a objetos, lo que significa que realiza una segmentación basada no solamente en la información espectral del objeto sino también en la textura, la forma y el contexto de los pixeles que pertenecen a un objeto, con todos estos parámetros el software hace la clasificación.

La justificación de hacer una clasificación, fue la de separar pixeles puros de la vegetación del trigo y evitar datos de reflectancia de otros objetos, el eCognition al tener dentro de sus herramientas una calculadora raster, fue posible realizar un algebra de mapas con lo cual se estimaron los índices de vegetación, por último y con ayuda del software Qgis se extrajo el valor promedio de los índices para cada unidad experimental

La comparación de los datos de cada uno de los sensores fue realizada haciendo uso de una hoja de cálculo (excel), en el cual se realizaron los gráficos de dispersión y se determinó la relación de las variables comparadas con el rendimiento del cultivo de igual manera se estimó el coeficiente de determinación R^2.

Resultados y Discusión

La toma de datos a nivel de tierra para los sensores ópticos GreenSeeker y SPAD fueron sincronizados con los vuelos del VANT, las mediciones se hicieron al mediodía para evitar algún efecto causado por el sombreado, después de revisar y procesar los datos de las distintas fuentes, se graficó la variable rendimiento con cada uno de los datos medidos con los sensores obteniendo los siguientes resultados:

En la **Figura 4** se muestran los resultados que se obtuvieron en la etapa fenológica de vaina engrosada.

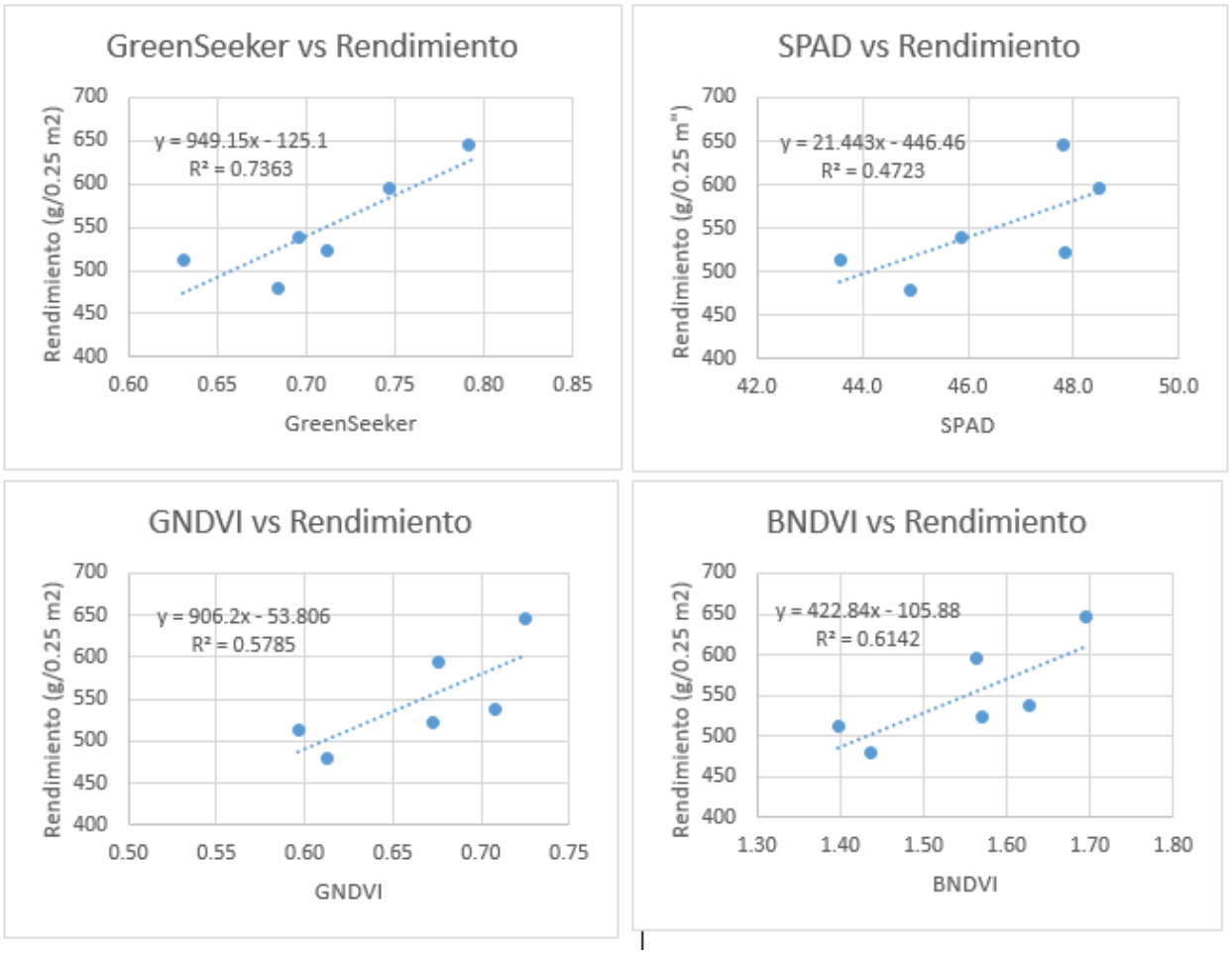

Figura 4. Relación entre el rendimiento y las lecturas de los tres sensores en la etapa fenológica de vaina engrosada.

Como se puede observar en la **Figura 4**, de manera general el rendimiento y las lecturas de los sensores presentan una relación lineal positiva, lo que quiere decir que el contenido de clorofila es que a mayor cantidad de nitrógeno aplicado mayor son los valores de los sensores, también si obtuvo como resultado que el sensor que mejor estimó el rendimiento de grano del cultivo de trigo en la etapa de vaina engrosada, fue el Greenseeker con un coeficiente de determinación R2= 0.7363 mientras que el SPAD fue el sensor que menos explica a la variable rendimiento al presentar un R2=0.4723.

En la **Figura 5** se presentan los resultados de las relaciones existentes entre el rendimiento y las lecturas de los distintos sensores usados en este trabajo de investigación durante la etapa fenológica de espigado.

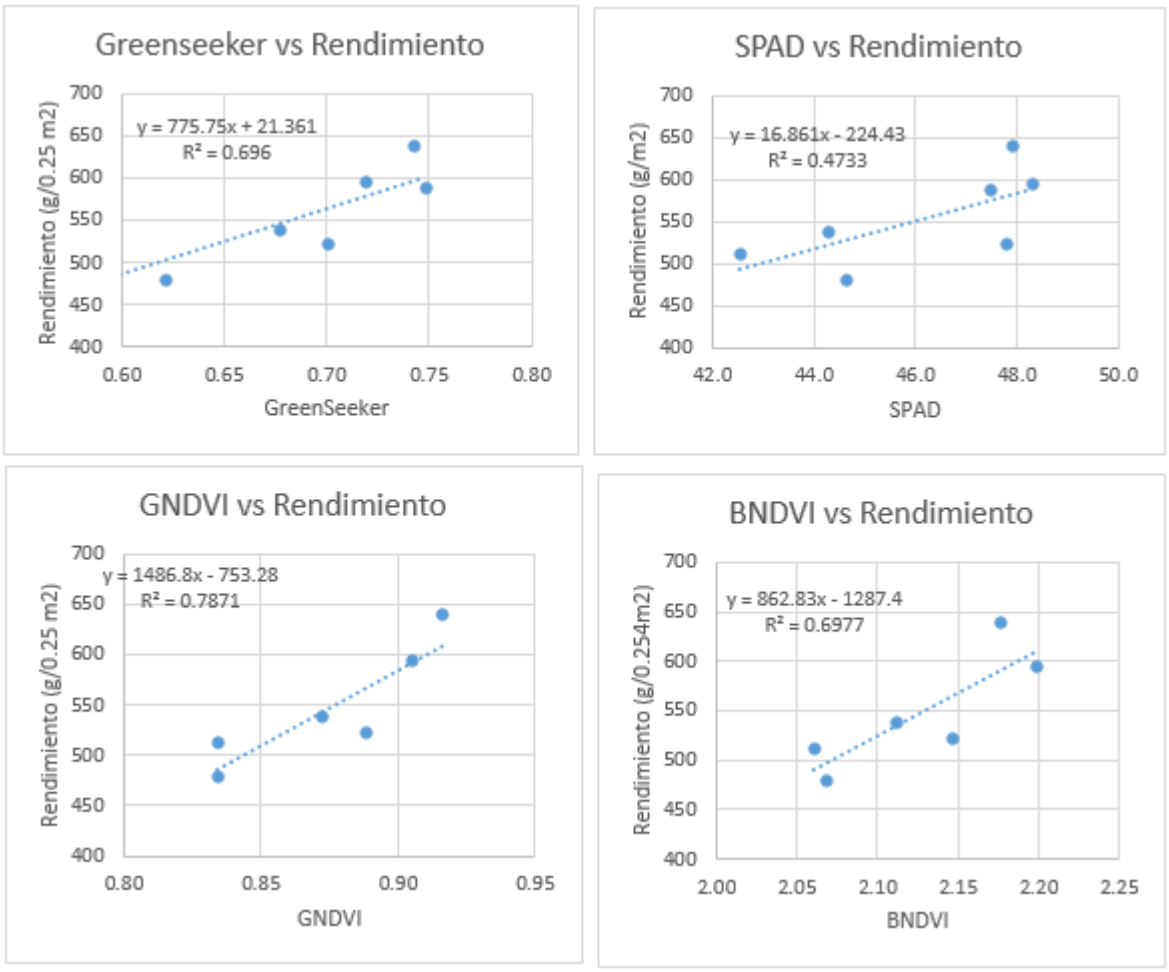

Figura 5. Relación entre el rendimiento y las lecturas de los tres sensores en la etapa de espigado.

Al igual que en la etapa fenológica de vaina engrosada, para esta esta fenológica igualmente el rendimiento presenta una relación lineal positiva con los valores obtenidos por los tres sensores, a diferencia de la primera etapa fenológica el índice de vegetación GNDVI es quien presento la mejor bondad de ajuste del modelo lineal con R^2=0.781, mientras que las lecturas del SPAD siguen siendo las que menos explican a la variable rendimiento con un coeficiente de determinación R^2=0.4733.

Conclusiones

Los valores dados por los sensores son relacionados linealmente positivos con la variable rendimiento, los sensores espectrales tanto próximos como aéreos presentan sensibilidad al cambio o condición de la clorofila presente en el cultivo de trigo.
El sensor GreenSeeker fue mejor en la estimación del rendimiento para la etapa más temprana del cultivo, la cual corresponde a vaina engrosada mientras que los índices de vegetación derivados del sensor infrarrojo montado en el VANT mostraron mejor

comportamiento para la etapa más cercana a la floración, el índice espectral GNDVI fue el mejor con un R^2=0.7871.

Se concluye que los índices derivados de sensores montados en vehículos aéreos no tripulados presentan valores similares a los medidos con sensores ópticos en tierra, con la ventaja de que este sistema ahorraría tiempo, y costos para la adquisición de parámetros que puedan pronosticar el rendimiento temprano de los cultivos.

Es necesario validar estos modelos para diferentes genotipos y condiciones ambientales, ya que está demostrado que estos factores afectan a las lecturas de los sensores ópticos, además de considerar la anisotropía de los datos colectados.

Referencias Bibliográficas

Bausch, W.C., and R. Khosla. 2010. QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. Precis. Agric. 11:274–290. doi:10.1007/s11119-009-9133-1.

Bu, H., L. K. Sharma, A. Denton, and D. W. Franzen. 2017. Comparison of Satellite Imagery and Ground-Based Active Optical Sensors as Yield Predictors in Sugar Beet, Spring Wheat, Corn, and Sunflower. Agron. J. 109:299-308. doi:10.2134/agronj2016.03.0150.

Caturegli, L., M. Casucci, F. Lulli, N. Grossi, M. Gaetani, S. Magni, E. Bonari, and M. Volterrani. 2015. GeoEye-1 satellite versus ground-based multispectral data for estimating nitrogen status of turfgrasses. Int. J. Remote Sens. 36:2238–2251.

Curran, P.J., J.L. Dungan, and H.L. Gholz. 1990. Exploring the relationship between refl ectance red edge and chlorophyll content in slash pine. Tree Physiol. 7:33–48.

Du, M.M.; Noboru, N. Multi-temporal Monitoring of Wheat Growth through Correlation Analysis of Satellite Images, Unmanned Aerial Vehicle Images with Ground Variable. In Proceedings of the 5th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture AGRICONTROL, Seattle, WA, USA, 14–17 August 2016.

Eisenbeiss, H. A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition. In Image Acquisition. In Proceedings of the International Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery, Pitsanulok, Thailand, 18–20 November 2004.

FAO, 2017. FAO y los ODS. Indicadores: Seguimiento de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. http://www.fao.org/3/a-i6919s.pdf.

FAO, Objetivos de Desarrollo Sotenible: Hambre cero. http://www.fao.org/sustainable-development-goals/goals/goal-2/es/. Vista el 2 de septiembre del 2019.

Filella, I., I. Serrano, J. Serra, and J. Penuelas. 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy refl ectance indices and discriminant analysis. Crop Sci. 35:1400–1405.

Genc, L., H. Turhan, B. Asar, and S.E. Smith. 2009. Comparison of spectral indices from QUICKBIRD and ground based hyper-spectral data for winter wheat. World App. Sci. J. 7:756–762.

István Monostori; Tamás Árendás;Borbála Hoffman; Gábor Galiba; Krisztián Gierczik; Fruzsina Szira y Attila Vágújfalvi.(2016). Relationship between SPAD value and

grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat. Euphytica 211: 103. https://doi.org/10.1007/s10681-016-1741-z. Springer Netherlands.

Rasmussen, J.; Ntakos, G.; Nielsen, J.; Svensgaard, J.; Poulsen, R.N.; Christensen, S. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? Eur. J. Agron. 2016, 74, 75–92. [Google Scholar] [CrossRef]

Raun, W., J. Solie, G. Johnson, M. Stone, E. Lukina, W. Thomason, and J.S. Schepers. 2001. In season prediction of potential grain yield in Winter wheat using canopy reflectance. Agron. J. 93:131–138. doi:10.2134/ agronj2001.931131x.

The Third National Agricultural Census Using UAV Remote Sensing. Available online: http://www.uavwrj.com/gne/427.html (accessed on 25 October 2016).

Trimble 2009. Trimble, Sunnyvale, CA. http://investor.trimble.com/ releasedetail.cfm?releaseid=388206 (accessed 9 Mar. 2016).

Wu XL 1 , Li CS 1 , Tang YL 1 , Liu YB 2 , Li BQ 3 , Fan GQ 4 y Xiong T 1

Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat. 28(6):1889-1898. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201706.008 The Journal of Applied Ecology.