

Utilización de imágenes aéreas multiespectrales para evaluar la disponibilidad de nitrógeno en maíz

R. Isla^{1*}, D. Quílez¹, F. Valentín³, M.A. Casterad¹, J. Aibar² y M. Maturano³

¹ Unidad de Suelos y Riegos (Unidad asociada EEAD-CSIC). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón. Gobierno de Aragón. Avda. Montañana 930, 50059, Zaragoza (España). E-mail*: risla@aragon.es.

² Departamento de Agricultura y Economía Agraria. Escuela Politécnica Superior de Huesca. (Carretera de Cuarte, s/n · 22071- Huesca. Universidad de Zaragoza (España).

³ Fundación para el Desarrollo Sostenible de Castilla-La Mancha (FUNDESCAM) Instituto Técnico Agronómico Provincial-ITAP. Avenida Gregorio Arcos s/n Apdo 451, 02080, Albacete (España)

RESUMEN

Utilizando información de dos ensayos de maíz realizados en Albacete y Zaragoza, se evaluó la utilidad de imágenes multiespectrales comerciales de alta resolución espacial (0.1 m) en el espectro del visible (azul, verde, y rojo) e infrarrojo cercano tomadas mediante avión para determinar el estado nutricional del maíz en fases intermedias (V15) del cultivo y en condiciones de regadío españolas. Considerando todas las parcelas de cada ensayo, los niveles digitales (ND) obtenidos en las cuatro longitudes de onda y varios de los índices de vegetación estudiados se encontraron significativamente ($P < 0.01$) correlacionados con las lecturas del medidor de clorofila (SPAD), muy asociado al contenido de N de las hojas. Las relaciones más elevadas, eliminando las parcelas más deficitarias, se presentaron para los ND en el verde (540-560 nm) y para el índice GNDVI. La relación entre los ND relativos a la parcela sobrefertilizada de cada ensayo en el verde en estado de 15 hojas y el rendimiento de grano fueron del mismo orden ($R^2 = 0.91$) que las obtenidas con el medidor de clorofila, y superiores a las obtenidas en otras longitudes de onda. Por lo tanto el ND en el verde obtenido a partir de imágenes multiespectrales comerciales resulta prometedor como herramienta para determinar el estado nutricional del maíz en un momento en que todavía es posible realizar aplicaciones de fertilizante nitrogenado y corregir deficiencias.

Palabras clave: maíz, fertilización nitrogenada, imagen multiespectral, SPAD, índices de vegetación

ABSTRACT

Using information from two maize field experiments in Albacete and Zaragoza, this work assess the utility of commercial multispectral images with high spatial resolution (0.1 m) in the visible spectrum (blue, green, and red) and near infrared taken by plane to determine the nutritional status of maize in intermediate growing stage (V15) under Spanish irrigated conditions. Considering all the plots of each trial, the digital values (ND) obtained at four wavelengths and several of the studied vegetation indices were linearly and significantly ($P < 0.01$) correlated with chlorophyll readings (SPAD). Removing the highly deficient plots which are unusual under normal field conditions, the strongest relations were obtained between SPAD readings and the ND in the green (540-560 nm) and GNDVI vegetation index. Relationship between the green ND values relative to overfertilized plot in the 15 leaves stage and grain yield was of the same magnitude ($R^2 = 0.91$) than that obtained with the chlorophyll meter (SPAD), and superior to those obtained in other wavelengths. Therefore, relative ND values in the green wavelength from a commercial multispectral image is a promising tool to determine the nutritional status of maize at a time when it is still possible applications of nitrogen fertilizer to correct deficiencies.

Keywords: maize, nitrogen fertilization, multispectral image, SPAD, vegetation indices

INTRODUCCIÓN

Una causa importante de la contaminación difusa de aguas es el excesivo uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, lo que llevó a la Unión Europea a establecer la Directiva 91/676/CEE, transpuesta en España por el Real Decreto 261/1996 regulando su uso en ciertas áreas. El cultivo del maíz tiene una gran importancia en España con una superficie que supera las 300,000 ha siendo uno de los cultivos donde se aportan mayores cantidades de fertilizantes nitrogenados.

El análisis de nitratos en el suelo y los medidores de clorofila en hoja ayudan al agricultor a decidir la cantidad de fertilizante N a aplicar. Sin embargo, difícilmente capturan la variabilidad espacial que suele existir dentro de las parcelas de cultivo, presentando además la dificultad práctica de implementarlos en parcelas de gran tamaño. La teledetección desde plataformas remotas (satélites o aviones) permite estudiar grandes zonas de cultivo y analizar la variabilidad espacial del desarrollo de los cultivos. Una detección temprana del nivel de suficiencia del nitrógeno permitiría un ajuste en tiempo real de la dosis de fertilizante N necesaria para optimizar el rendimiento. Blackmer y Shepers (1996) mostraron la posibilidad de evaluar la disponibilidad de N en el cultivo del maíz mediante el análisis de imágenes aéreas. Trabajos posteriores han demostrado la aplicabilidad y la mayor capacidad de datos de reflectividad de alta resolución espectral en la estimación del contenido en clorofila de la hoja. Los trabajos de Haboudane et al. (2002) e Isla y López-Lozano (2005) proponen diferentes índices espectrales buscando la máxima sensibilidad al contenido en clorofila y una baja sensibilidad a otros factores.

Este trabajo evalúa la información derivada de imágenes comerciales de alta resolución espacial tomadas desde avión con un sensor multispectral en el espectro del visible (azul, verde, y rojo) e infrarrojo cercano para diagnosticar el estado nutricional del maíz en fases intermedias del cultivo (V15), cuando todavía es posible realizar un ajuste de la fertilización nitrogenada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante 2010 se realizaron dos ensayos de maíz cultivado en riego por aspersión en Zara-

goza (ZAR) y Albacete (ALB). El nivel de nitrógeno disponible en las diferentes parcelas experimentales fue variable debido a distintos niveles de nitrógeno mineral inicial en el suelo y en los que además se aplicaron distintas dosis de fertilizante nitrogenado. La Tabla 1 presenta un resumen de las características más importantes de ambos ensayos.

| Característica | Zaragoza | Albacete |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Nº parcelas | 63 | 51 |
| Sup. parcela, m ² | 56 | 35 |
| N aplic., kg N/ha | 0 a 400 | 0 a 300 |
| Riego, mm | 703 | 844 |
| Híbrido usado | PR34N43, Pioneer | PR34N43, Pioneer |
| Densidad, pl/ha | 74652 | 84077 |
| Siembra-cosecha | 10/05-7/10 | 5/05-8/10 |
| Textura, USDA | franca | fr-arc-are |
| Nitrato inicio. (mg/kg, 0-30 cm) | 5.7 a 26.7 | 4.9 a 37.1 |
| Prof. suelo, cm | 120 | 40 |
| Pedregosidad, % | 0-12 | 43 |

Tabla 1: Características generales de los ensayos, diseño experimental, manejo del cultivo y tipo de suelo.

Por lo tanto en ambos ensayos se dispuso de parcelas con distintos niveles de suficiencia de nitrógeno, desde deficitarias hasta sobrefertilizadas. Antes de que se iniciara la floración masculina del maíz (V15), se evaluó en campo el estado nutricional del cultivo mediante la lectura con el medidor de clorofila SPAD (SPAD-502, Minolta Camera Co., Ltd., Japon), sobre la hoja de la mazorca en un total de 20 plantas de las dos líneas centrales de cada parcela. Dichas medidas se realizaron en julio, el día 21 en ZAR y el 20 en ALB. En ese mismo día y en cada uno de los ensayos se realizó, cerca del mediodía solar, un vuelo comercial (RS Servicios de Teledetección S.L., Lleida, España) con avión ligero tripulado que mediante un sensor multispectral (DMSI) que proporciona imágenes corregidas radiométrica y geométricamente con una resolución espacial de 0.1 m y resolución radiométrica de 14 bits. No se realiza corrección atmosférica. A partir de los niveles digitales (ND) de las mismas en las bandas del azul (B, 440-460 nm), verde (G, 540-560 nm), rojo (R, 665-685 nm), e infrarrojo cercano (NIR, 770-790 nm), se calcularon los siguientes índices de vegetación:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$$

$$RDVI = \frac{NIR - R}{\sqrt{NIR + R}} \quad NPCI = \frac{NIR - B}{NIR + B} \quad SR = \left(\frac{NIR}{R} \right)$$

En cada ensayo se obtuvo una máscara de la zona central de cada parcela experimental, excluyendo las líneas de maíz bordes e incluyendo las 2 y las 3 líneas centrales en los ensayos de ZAR y ALB, respectivamente. A partir de esta máscara se determinó, para cada parcela, los ND medios en cada banda y el valor medio de cada índice.

Al final del experimento se procedió al cosechado manual de las parcelas de maíz obteniéndose la producción de grano en cada una de ellas. Para las parcelas (16 en ALB y 21 en ZAR) que no recibieron fertilizante después de haber tomado las imágenes se obtuvieron los valores relativos de los ND, índices de vegetación y rendimiento de grano, dividiendo el valor obtenido en cada parcela por el valor obtenido en las parcelas sobrefertilizadas de cada ensayo.

Para ver la utilidad de la información derivada de las imágenes se calcularon las relaciones entre el rendimiento de grano de cada parcela y las lecturas del medidor de clorofila (SPAD), los ND y los índices de vegetación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron, en general, correlaciones lineales (r) significativas entre las lecturas de SPAD y los ND obtenidos (Tabla 2), siendo las correlaciones más altas en el ensayo de ZAR que en ALB. Las correlaciones más elevadas se obtuvieron para la banda del verde (ND_G), lo que concuerda con el trabajo de Blackmer et al., (1994), a pesar de que el medidor de clorofila mide la transmitancia en una longitud de onda del rojo. Las correlaciones disminuyeron de forma notable al excluir del análisis las parcelas más deficitarias, parcelas que difícilmente se encuentran en condiciones normales de cultivo.

Prácticamente para casi todos los índices de vegetación calculados, las correlaciones con las lecturas de SPAD fueron altamente significativas (Tabla 2), aunque con valores moderados que oscilaron entre 0.65 y 0.83 en ZAR y entre 0.46 y 0.70 en ALB. Estas correlaciones disminuyeron de forma notable al excluir las parcelas con elevado déficit de nitrógeno. En todos los casos,

el GNDVI fue el índice que presentó una mayor correlación con las lecturas de SPAD, con valores de 0.62 y 0.58 para los ensayos de ZAR y ALB, respectivamente, lo que es coherente con la mayor correlación observada con los ND en el verde.

| Índice | ---Zaragoza--- | | ---Albacete--- | |
|-------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| | Todas (n=63) | T-D ¹ (n=58) | Todas (n=51) | T-D ¹ (n=47) |
| ND _B | -0.78** | -0.52** | -0.50** | -0.31* |
| ND _G | -0.86** | -0.67** | -0.67** | -0.55** |
| ND _R | -0.79** | -0.56** | -0.49** | -0.27ns |
| ND _{NIR} | 0.56** | 0.31* | 0.55** | 0.31* |
| GNDVI | 0.83** | 0.62** | 0.70** | 0.58** |
| NDVI | 0.74** | 0.47** | 0.55** | 0.33** |
| NPCI | 0.76** | 0.49** | 0.59** | 0.39** |
| RDVI | 0.65** | 0.37** | 0.56** | 0.33** |
| SR | 0.70** | 0.46** | 0.46** | 0.22ns |

¹, Todas menos las parcelas muy deficitarias

Tabla 2: Correlaciones (r) entre las lecturas de SPAD y las variables derivadas a partir de las imágenes (NDx e índices de vegetación).

Es importante demostrar que las medidas obtenidas a partir de las imágenes aéreas están, no solo relacionadas con el nivel de suficiencia de N o lecturas SPAD, sino que están asociadas al rendimiento del cultivo al menos tan bien como lo están las lecturas del sensor de clorofila.

Tal como se observa en la Figura 1a, los valores de SPAD relativos (SPAD_r, %) de las plantas de maíz en estado de V15 se relacionaron linealmente con el rendimiento de grano en ambos ensayos. El coeficiente de determinación (R^2) fue elevado en ambos ensayos, ya que en conjunto las lecturas de SPAD explican un 88% de las diferencias de rendimiento entre las distintas parcelas y las relaciones no fueron significativamente diferentes ($P>0.05$) entre los dos ensayos. Los valores relativos de GNDVI están también altamente relacionados con el rendimiento de grano en cada uno de los ensayos (Fig. 1b), explicando en promedio un 86% de la variabilidad del rendimiento de grano. Sin embargo las relaciones obtenidas en ambas localidades fueron significativamente diferentes ($P<0.05$) entre sí.

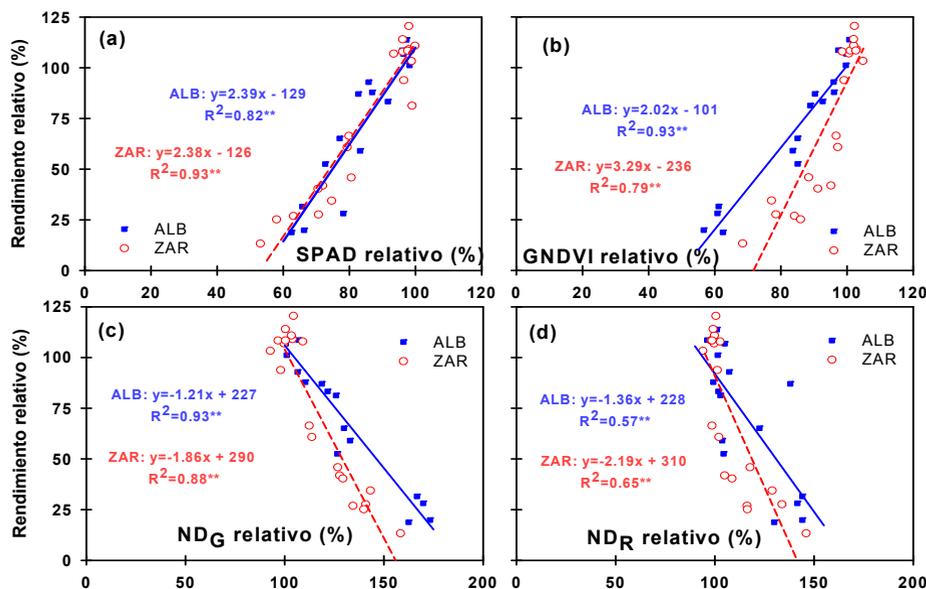


Figura 1: Relación entre el rendimiento de grano relativo (%) y los valores relativos de (a) SPAD, (b) GNDVI, (c) nivel digital en el verde (ND_G), y (d) nivel digital en el rojo (ND_R). Las variables medidas se han relativizado a la parcela sobrefertilizada de cada localidad.

Por su mayor simplicidad frente a los índices se presentan las relaciones entre el rendimiento relativo y los niveles digitales en el verde (Fig. 1c) y en el rojo (Fig 1d). Si bien para ambas longitudes de onda la relación con el rendimiento de grano fue significativa ($P < 0.05$), queda patente que la relación es mejor para el verde (R^2 promedio=0.91) que para el rojo (R^2 promedio=0.61). Las regresiones lineales fueron significativamente diferentes en ambas localidades en el caso del verde (R_G), pero no en el rojo (R_R).

CONCLUSIONES

Tanto por su correlación con el contenido de clorofila, como con el rendimiento de grano, el nivel digital (ND) en el verde (540-560 nm) obtenido a partir de imágenes multispectrales comerciales en fases intermedias (V15) del cultivo del maíz parece prometedora para evaluar el estado nutricional del cultivo. Su viabilidad real como herramienta de decisión requiere de un menor coste, por lo que sería preciso realizar trabajos en parcelas de cultivo comerciales con imágenes de menor resolución espacial.

BIBLIOGRAFÍA

- BLACKMER, T.M., SCHEPERS, J.S., VARVEL, G.E., 1994. *Light Reflectance Compared with Other Nitrogen Stress Measurements in Corn Leaves*. *Agronomy Journal* 86:934-938.
- BLACKMER, T.M. and SCHEPERS, J.S. 1996. *Aerial photography to detect nitrogen stress in corn*. *Journal of Plant Physiology* 148:440-444.
- HABOUDANE, D., MILLER, J.R., TREMBLAY, N., ZARCO-TEJADA, P.J., DEXTRAZE, L., 2002. *Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture*. *Remote Sens. Environ.* 81 :416-426.
- ISLA, R., LÓPEZ-LOZANO, R., 2005. *Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz*. *Revista de teledetección* 24:5-9.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (AGL2009-12891-C02-02). Los autores agradecen a Rosa Gómez (CITA) por el trabajo de procesado de las imágenes y a Laura Garrido por su apoyo en los trabajos de campo.