

Evaluación de índices de vegetación para estimar nitrógeno foliar en el cultivo de triticale (*Triticosecale wittmack*) mediante teledetección

Evaluation of vegetation indexes to estimate foliar nitrogen in the triticale (*Triticosecale wittmack*) by teledetection

* Miguel Rivera-González, Erika Nava-Reyna, Aldo Rafael Martínez-Sifuentes y Julián Cerano-Paredes

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA), INIFAP. Km. 6.5 margen derecha Canal de Sacramento, Gómez Palacio, C.P. 35140, Gómez Palacio, Durango.

*Autor para correspondencia:rivera.miguel@inifap.gob.mx

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar 5 índices de vegetación para estimar nitrógeno foliar en el cultivo de triticale. Los índices de vegetación evaluados fueron: Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), índice de clorofila verde (CIgreen), Índice de clorofila del borde rojo (CL red-edge), índice del borde rojo de diferencia normalizada (NDRE) y el índice de vegetación triangular modificado (MTVI2). Los índices de vegetación se obtuvieron de imágenes del satélite sentinel 2A y 2B. En forma simultánea se realizaron muestreos foliares, estos muestreos consistieron en cosechar el forraje (plantas completas) de una superficie de 0.25 m², a partir de las muestras foliares se determinaron las variables, altura de planta, materia seca a peso constante, concentración de nitrógeno (%N) en base a la biomasa seca, nitrógeno extraído por el cultivo (NEC) en Kg ha⁻¹, el cual se obtuvo al multiplicar N% por la materia seca. No se encontró correlación significativa al asociar los índices de vegetación evaluados con el contenido de nitrógeno expresado en forma de concentración (%N). Los índices de vegetación de clorofila verde (CIgreen), el índice del borde rojo de diferencia normalizada (NDRE) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) fueron los índices que presentaron los coeficientes de correlación más altos ($r^2=0.80$ para ambos) al ser asociados con el nitrógeno extraído por el cultivo (NEC).

Palabras clave: nitrógeno, teledetección, triticale

ABSTRACT

The objective of this research work was to evaluate 5 vegetation indices to estimate foliar nitrogen in the culture of triticale. Vegetation indices evaluated were: Normalized difference vegetation index (NDVI), soil-adjusted vegetation index (SAVI), green chlorophyll index (CIgreen), Red-edge chlorophyll index (CL red-edge), index of red border of standardized difference (NDRE) and the modified triangular vegetation index (MTVI2). Vegetation indices were obtained from sentinel 2A and 2B satellite images. Simultaneously foliar sampling was performed, these sampling consisted of harvesting the forage (complete plants) of an area of 0.25 m², from the foliar samples the variables were determined, plant height, dry matter at constant weight, nitrogen concentration (% N) based on dry biomass, nitrogen extracted by the crop (NEC) in Kg ha⁻¹ which was obtained by multiplying N% by dry matter. No significant correlation was found when associating the vegetation indices evaluated with the nitrogen content expressed as a concentration (% N). Vegetation indices of green chlorophyll (CIgreen), the index of the red border of normalized difference (NDRE) and the

index of vegetation adjusted to the soil (SAVI) were the indices that presented the highest correlation coefficients ($r^2 = 0.80$ for both) when associated with the nitrogen extracted by the crop (NEC).

Key words: nitrogen, remote sensing, triticales

INTRODUCCIÓN

De los métodos que existen actualmente para determinar la concentración y monitoreo del nitrógeno en la planta, los métodos basados en el análisis foliar tales como el Kjeldahl (Kjeldahl, 1883) y Dumas (Dumas, 1831) han sido los más utilizados, sin embargo, tienen la desventaja de ser métodos destructivos, tardados, puntuales y caros (Muñoz *et al* 2013). Otra alternativa es utilizar otros métodos tales como la teledetección que tiene el potencial de evaluar el contenido de nitrógeno a las escalas de planta, parcela, modulo y distrito de riego (Schlemmer *et al* 2013). El uso de las imágenes de satélite para monitorea nitrógeno en los cultivos requiere el uso de un algoritmo o índice de vegetación y su correlación con el contenido de nitrógeno del cultivo expresado este en forma de concentración (N%) o el nitrógeno que extrae el cultivo por unidad de superficie (NEC). Recientemente Xue y Su, (2017) menciona que a la fecha se han generado más de 100 índices de vegetación para una gran cantidad de usos, sin embargo, solamente un número limitado se ha usado para determinar nitrógeno foliar con correlación significativa. Al respecto Rodríguez *et al* (2011), evaluaron 21 índices de vegetación para estimar el contenido de nitrógeno del cultivo de triticali. Los modelos obtenidos se generaron al correlacionar los índices de vegetación vs el contenido de nitrógeno expresado en forma de concentración (N%). Las mediciones de reflectancia se realizaron a los 80,117, 132 y 164 DDS, utilizando un espectroradiómetro (FieldSpect 3). no encontraron correlación significativa para ninguno de los índices de vegetación evaluados, siendo el índice de reflectancia del verde (R_{550}) el que presento el mayor coeficiente de correlación(r^2) de 0.31. Chlemmer *et al* (2013) utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2 para evaluar diferentes

índices de vegetación en el cultivo de maíz, para lo cual también evaluaron 5 tratamientos de aplicación de nitrógeno (0, 50,100,150 y 200 Kg de N ha⁻¹) encontraron que los índices de vegetación: punto de inflexión del borde rojo(REP), índice de clorofila terrestre MERIS (MTCI), índice de clorofila verde (CLgreen) e índice de clorofila del borde rojo (CLred-edge). Presentaron los coeficientes de correlación más altos (0.90, 0.80, 0.79 y 0.78 respectivamente), al correlacionarlos con el contenido de nitrógeno (g. de N m⁻²). López (2017) menciona la importancia del borde rojo en el monitoreo de nitrógeno foliar, definiendo a este como una región de transición de cambio rápido en la reflectancia foliar causada por la fuente de absorción de pigmentos en el espectro rojo y dispersión foliar en el espectro NIR el cual es sensible a la clorofila del dosel y a la concentración de nitrógeno (Chang-Hua *et al* 2010). Söderström *et al* (2017) genero un modelo para estimar el contenido de nitrógeno del cultivo de trigo (diferentes variedades y localidades) para una superficie de 2.5 millones de hectáreas en Suecia a partir del índice de vegetación MSAVI2 calculado a partir de las imágenes de los satélites Sentinel 2 y DMS y utilizando el sistema de soporte de decisiones CropSAT con un rango de error de 11-15 Kg de N/ha. Recientemente Yuan *et al* (2019) en el cultivo de triticali, evaluaron 4 índices de vegetación (NDVI, GRVI, GNDVI y TVI): los índices de vegetación se obtuvieron de imágenes tomadas con un dron (Master Aircscrew, California), con vuelos a una altura de 100 m. y una resolución espacial de 15 cm. Los coeficientes de correlación se obtuvieron al asociar los índices de vegetación con el nitrógeno extraído en ton ha⁻¹. Obtuvieron coeficientes de correlación de 0.87, 0.93,0.89 y 0.90 para los índices de vegetación NDVI, GRVI,



GNDVI y TVI respectivamente. El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar 5

índices de vegetación para estimar nitrógeno foliar en el cultivo de triticali.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en la PP. El Porvenir del municipio de Francisco I. Madero Coahuila, lugar ubicado en la Región Lagunera (Figura 1). Su ubicación geográfica es

25°46'53.2" latitud norte y 103°18'28.0" longitud oeste a una altura de 1109 msnm (metros sobre el nivel del mar).



Figura 1. Localización del área de estudio PP. Porvenir Municipio de Francisco I Madero Coahuila, ubicada en la Región Lagunera

El cultivo de triticali se estableció en el ciclo de invierno, en una superficie de 23.6 hectáreas, variedad Rio Nazas, sembrada el 2 de noviembre en surcos espaciados a 20 cm. Se evaluaron y compararon 6 índices de vegetación para estimar la concentración de nitrógeno foliar,

los cuales se describen en el Cuadro 1, estos índices se seleccionaron de una revisión exhaustiva de trabajos de investigación realizadas por investigadores de diferentes países.

Cuadro 1. Índices de vegetación evaluados

Índices de vegetación	Símbolo	Ecuación	Autor
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED}$	Rouse <i>et al.</i> , 1974
Índice de vegetación ajustado al suelo	SAVI	$SAVI = \frac{(1 + 0.5)(\rho NIR - \rho RED)}{(0.5 + \rho NIR + \rho RED)}$	Huete, 1988
Índice del borde rojo de diferencia normalizada	NDRE	NDRE= (740 nm-783 nm)/(740 nm+780nm)	Barnes <i>et al</i> 2000
Índice de clorofila del borde rojo	CLred-edge	CLred-edge=(NIR/RED edge)-1	Gitelson <i>et al</i> (2003)
Índice de clorofila verde	CL green	CL green=(NIR/green)-1	Gitelson <i>et al</i> (2005)
Índice de vegetación triangular modificado	MTVI2	$MTVI2 = [1.8(NIR-G)-3.75(R-G)] / [(2NIR+1)^2-(6NIR-5RED^2)]^{0.5}$	Haboudane <i>et al</i> (2003)

ρNIR es la reflectividad medida en el infrarrojo cercano (Band_ 05) y ρRED es la reflectividad medida en la región del espectro electromagnético (Band_04).

Los índices de vegetación se calcularon a partir de imágenes del satélite sentinel 2A y 2B obtenidas en 9 fechas, durante el ciclo

vegetativo del cultivo, sin embargo 2 de estas imágenes se desecharon por problemas de nubosidad. Las fechas de obtención de las imágenes del satélite se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fechas de las imágenes obtenidas del satélite sentinel 2A y 2B para el cultivo de triticali durante su ciclo vegetativo años 2018-2019).

Año	Sentinel 2A	Sentinel 2B
2018	29 de noviembre	X
	14 de diciembre	X
	24 de diciembre	X
	3 de enero	X
	13 de enero	X
2019	23 de enero	X
	2 de febrero	Imágenes desechadas por presencia de nubes
	12 de febrero	
	22 de febrero	X

En forma paralela a la obtención de las imágenes de satélite, se realizaron muestreos foliares, para determinar las siguientes variables: forraje verde, materia seca a peso constante, % de nitrógeno (método Kjeldahl,1988), altura de planta y el contenido de nitrógeno extraído por el cultivo(NEC) por unidad de superficie (ton/ha).

Las plantas se cosecharon de una superficie de 0.25 m². Para cada fecha de muestreo se obtuvieron 10 muestras de forraje, las cuales se georreferenciaron y ubicaron a partir de una imagen de satélite obtenida en una fecha previa a la fecha del muestreo considerando los valores y distribución espacial del NDVI.



El procedimiento que se realizó para la determinación de los índices de vegetación con las imágenes de satélite fue el siguiente.

Descarga de las imágenes del satélite sentinel 2A y 2B.

Las imágenes se obtuvieron de forma gratuita en el sitio web Copernicus Open Access Hub. Este satélite proporciona datos radiométricos a través de 13 bandas: cuatro de las bandas espectrales de resolución espacial de 10 m, seis de 20 m y tres de 60 m y que cuenta con una escala temporal de 5 días

Corrección radiométrica.

La conversión a radiancia (energía enviada en una dirección dada hacia el sensor) y reflectancia (relación entre la reflejada contra la potencia total de energía) se ejecuta automáticamente, esto debido a que la imagen cuenta con un archivo metadato (MTD_TL.xml) que contiene la información requerida para la conversión. La conversión de bandas a reflectancia automáticamente se realiza

mediante el complemento Semi_Automatic Classification Plugin que se instala en el software Qgis. Para la conversión de bandas se utiliza el complemento SCP que se encuentra una vez instalado en la barra de panel del programa Qgis y seleccionamos Sentinel-2, posteriormente seleccionamos la carpeta donde se encuentran las bandas y se carga la lista de las bandas y el Metadato automáticamente, para el cálculo de la reflectancia de la superficie es necesario activar la opción Aplicar corrección atmosférica DOS1, para iniciar el proceso seleccionaremos el botón  y seleccionaremos la carpeta donde se guardaran las bandas convertidas a reflectancia.

Para determinar el grado de asociación entre los diferentes índices de vegetación y el contenido de nitrógeno del cultivo expresado como (N%) y (NEC) se utilizó el coeficiente de correlación (r^2) obtenido del modelo potencial.

RESULTADOS

Variables de los muestreos foliares.

En el cuadro 3 se presentan los valores promedio de los diferentes puntos de muestreo de las variables determinadas en cada fecha durante el ciclo vegetativo del cultivo. La altura de planta osciló en un rango de 10 a 92 cm. La materia seca fluctuó de 93.2 a 9,797 Kg ha⁻¹, la

concentración de nitrógeno en un rango de 5.0 a 3.1 %, tendiendo a disminuir a medida que avanza el ciclo vegetativo del cultivo, este es un comportamiento común encontrado en plantas C₃ y C₄ (Lemaire *et al* 2008) el nitrógeno extraído por el cultivo (NEC) fluctuó en un rango de 4.8 a 340 Kg/ha, este tendió a aumentar a medida que avanza el ciclo vegetativo del cultivo

Cuadro 3. Valores promedio de las variables determinadas de los muestreos foliares realizados en el campo

Fecha de muestreo	Altura de planta	M.S.	N	NEC
	(cm)	(Kg ha ⁻¹)	(%)	(Kg ha ⁻¹)
30 de noviembre	10	93.2	5.0	4.8
14 de diciembre	17	766.2	4.1	31.8
24 de diciembre	40	1652.5	4.4	72.9
3 de enero	27	1972.0	3.5	72.9
15 de enero	30	1844.3	3.1	55.1
23 de enero	44	3208.1	3.2	90.0
22 de febrero	92	9797.6	3.5	340.1



Índices de vegetación.

Los valores promedio del índice del borde rojo de diferencia normalizada (NDRE) fluctuaron en un rango de 0.073 a 0.594, para el índice de clorofila del borde rojo (CLred-edge) estos valores fueron de 0.322 a 4.978, el índice de vegetación triangular modificado los valores

fluctuaron en un rango de 0.168 a 2.841. Para el índice de vegetación NDVI los valores oscilaron de 0.191 a 0.830. Los valores de los índices de vegetación Clgreen y SAVI presentaron mejor tendencia en rangos de 1.072 a 7.736 y de 0.66 a 0.440 respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores de los índices de vegetación promedio, obtenidos partir de las imágenes de satélite en las diferentes fechas de muestreo.

Fecha de Muestreo	Índices de vegetación					
	NDRE	Cl red-edge	Clgreen	MTVI2	NDVI	SAVI
30 de nov.	0.073	0.322	1.072	0.168	0.191	0.066
14 de diciembre	0.235	0.889	2.261	1.486	0.390	0.198
24 de diciembre	0.314	1.298	2.916	1.742	0.487	0.218
3 de enero	0.408	2.343	4.083	2.470	0.631	0.263
15 de enero	0.464	2.692	4.462	2.841	0.702	0.319
23 de enero	0.429	2.348	4.645	2.160	0.676	0.326
22 de Febrero	0.594	4.978	7.736	1.576	0.830	0.440

Modelos generados para estimar la concentración de nitrógeno foliar

En el Cuadro 7 se presentan los coeficientes de correlación y modelos (ecuaciones de tipo potencial) obtenidas para los índices de vegetación al correlacionarlos con el contenido de nitrógeno del cultivo, expresado como N% y el nitrógeno extraído por unidad de superficie (NEC), para el cultivo de triticali. Los índices CLgree, SAVI y NDRE presentaron los

coeficientes de correlación más altos de 0.80, 0.80 y 0.78 respectivamente. Los coeficientes de correlación más bajos (0.71, 0.70 y 0.53) los presentaron los índices NDVI, CL red-edge y MTVI2. (Cuadro 5). Las correlaciones entre los índices de vegetación evaluados y el contenido de nitrógeno foliar (N%), se ajustaron mejor a modelos de tipo polinomial de segundo orden, sin embargo, estos no fueron significativos en base a las pruebas de significancia realizadas.

Cuadro 5. Ecuaciones y coeficientes de correlación obtenidas para los índices de vegetación evaluados para el cultivo de triticali (ciclo de invierno)

Índices de vegetación	Símbolo	Modelos obtenidos			
		NEC	N%		
		Ecuación	r ²	Ecuación	r ²
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	NEC=193.88NDVI ^{2.2223}	0.71	N%=2.553NDVI ² -5.360NDVI+5.896	0.41
Índice de vegetación ajustado al suelo	SAVI	NEC= 677.9SAVI ^{1.8348}	0.80	N%=16.052SAVI ² -12.155SAVI+5.637	0.34
Índice del borde rojo de diferencia normalizada	NDRE	NEC=319.89NDRE ^{1.6827}	0.80	N%=3.995NDRE ² -5.943NDRE+5.326	0.36
Índice de clorofila del	CLrd-edge			N%=0.157CLRE ² -	0.37



borde rojo		NEC=25.978CLRE	0.70	1.127CLRE+5.122	
		1.2547			
Índice de clorofila verde	CLgreen	NEC=4.52CLG	1.9306	N%=0.076CLG ² -0.910CLG+5.845	0.41
Índice de vegetación triangular modificado	MTVI2	NEC=193.88MTVI2X	0.53	N%=0.123MTVI2 ² -0.922MTVI2+4.999	0.30
		0.8759			

DISCUSION

No se encontró correlación significativa al asociar los índices de vegetación evaluados y el contenido de nitrógeno foliar expresado como el %N en base a materia seca de la biomasa (parte aérea de la planta), este resultado coincide con los resultados obtenidos por (Rodríguez *et al* 2011). Quien obtuvo bajos coeficientes de correlación al evaluar 21 índices de vegetación para el cultivo de triticali. Con respecto al índice de vegetación de diferencia normalizada(NDVI), en este trabajo se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.71 inferior al coeficiente de

correlación obtenido por Yuan *et al* (2019) quien obtuvo un r² de 0.87 esto se puede explicar en base a las diferencias de resolución del sensor empleado ya que este investigador obtuvo el NDVI a partir de imágenes obtenidas con un dron con una resolución de 15 cm. por pixel. El índice de clorofila verde (CLgreen) fue uno de los índices que mostro mayor correlación (r²=0.8) para estimar el nitrógeno extraído por el cultivo(NEC), este índice ha mostrado consistencia para diferentes cultivos tales como trigo (Sonderstrom *et al* 2017) maíz (Li *et al* 2014 ; Chlemmer *et al* 2013 y Rivera *et al* 2017) y triticali (Yuan *et al* 2019).

CONCLUSIONES

Los índices de vegetación de clorofila verde (Cl green), el índice del borde rojo de diferencia normalizada (NDRE) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) fueron los índices que presentaron los coeficientes de correlación más altos (r²=0.80 para ambos) al ser asociados con el nitrógeno extraído por el cultivo (NEC). No se encontró correlación significativa al asociar los índices de vegetación evaluados y la concentración de nitrógeno (N%).El índice de vegetación de clorofila verde (CLgreen) fue el índice que ha mostrado mayor consistencia en los cultivos de triticali, trigo y maíz. Todos los modelos obtenidos para estimar el nitrógeno extraído por el cultivo (NEC), a partir de los índices de vegetación evaluados se ajustaron mejor a modelos de tipo potencial.

LITERATURA CITADA

Barnes E.M., Clarke TR, Richards SE, Colaizzi PD, Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T. 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: proceeding of the 5° International Conference on Precision Agriculture, Madison, USA: ASA-CSSA(published on CD. Pag. 5.

Chang-Hua JU. Yong-Chao TIAN Xia YAO, Wei-Xing CAO, Yan Zhu D. Hannaway. 2010. Estimating leaf chlorophyll content using red edge parameters. Pedosphere volume 20. Issue 5. Pag. 633-644.

Dumas, J.B. 1831. Procedes de l analyse organique. ANN Chim. Phys. Pag.198-2013

Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and



- algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Phys.* 160: 271-282.
- Haboudane D., Miller J.R., Pattey E., Zarco-Tejada P.J., and Strachan I.B., 2003. Hyper spectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *J. Remote Sens. Environ.*, 90, 337-352.
- Huete, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), pp.295-309.
- Kjeldahl J. 1883. Neu method zur bestimmung des stickstoffs in organischen Korpern. *Fresenius J. Anal. Chem.* Vol 22 pag. 366-382
- Lemaire G, M.H. Jeuffroy, F. Gastal. 2008 . Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *Eur. J Agron.* 28(4):614–624
- Li F., Miao Y., Feng G., Yuan F., Yue S., Gao X., Liu Y., Lui B., Susan L. U. y Chen X. 2014. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red-edge based spectral vegetation indices. *Field Crops Research* 157 pag. 111-123.
- López C., M.J. 2017. Uso de índices espectrales y su relación con el contenido de nitrógeno del cultivo. *Memorias de la XXIX Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED.* Pag. 28-35
- Muñoz H., R.F., Guevara G. R.G., Contreras M. L.M., Pacheco T. I. Prado O. J. y Ocampo V. R.V. 2013. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: ventajas, desventajas and recent advances. *Sensores* 13 pag. 10824-1843.
- Rivera G.,M. , Delgado R. G., Miguel V. E., Servín P. A. J., Reyes G. A. , Servín P. M. y Estrada A. J. 2017. Estimación de la variación espacial y temporal de la concentración de nitrógeno en maíz forrajero mediante sensoria remota. AGROFAZ.
- Rodriguez M.,F. y C.F. Llera . 2011. Evaluating spectral vegetation indices for a practical estimation of nitrogen concentration in dual-purpose (forage and grano) triticale. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9 (3) pag. 681-683.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., and Harlan, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA*, pp. 1–371.
- Schlemmer M.S., A. Gitelson, J. Schepers, R. Ferguson, Y. Peng, J. Shanahan y D. Rundquist. 2013. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 25. Pag. 47-54
- Söderström. M., K. Piikki, M. Stenberg H, Stadig y J. Matinsson. 2017. Producing nitrogen(N) uptake maps in winter wheat by combining proximal crop measurements with sentinel-2 and DMC satellite images in a decision support system for farmers. *Acta Agriculturae Scandinavica Seccion B. Soil Plant Science.* Vol. 67 N° 7: 637-650.
- Xue J. and B. Su. 2017. Significant remote sensing vegetation indices a review of developments and applications. *Journal of Sensores* pag. 1-1
- Yuan M. , J.C. Burgel, J. Isermann, N.J. Groeser y C.M. Pittelkow. 2019. Unmanned aerial vehicle –based assessment of cover crop biomass and nitrogen uptake variability. *Journal of Soil and water conservation.* Vol.74 N° 4 pag. 350-359.