

CARACTERIZACIÓN DEL ESTRÉS DE NITRÓGENO EN PAPA PARA INDUSTRIA USANDO EL NDVI

CLAUDIA MARCELA GILETTO^{1*}; SANDRA ELIZABETH SILVA¹; MARÍA NATALIA CASSINO¹;
ESTER CRISTINA ZAMUNER¹ & HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA¹⁻²

Recibido: 30-12-15

Recibido con revisiones: 01-04-16

Aceptado: 04-04-16

RESUMEN

La medición de la reflectancia con sensores ópticos tiene el potencial de proporcionar información sobre el estatus de nitrógeno (N) durante el ciclo del cultivo de papa para industria y podría predecir la dosis de N. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar el estatus de N utilizando los sensores ópticos, GreenSeeker 506 (GS) y CropCircle ACS 210 (CC), compararlos y proporcionar algoritmos que pueden utilizarse para definir umbrales de suficiencia de N. Se realizaron tres experiencias en el cultivo de papa con dosis de N durante las campañas 2009/10, 2010/11 y 2012/13. El rendimiento de los tubérculos aumentó por efecto de la fertilización nitrogenada y esto varió con la campaña agrícola. La relación entre los valores del índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) de los dos sensores fue significativa a lo largo del ciclo con elevados coeficientes de determinación ($R^2 = 0,74-0,99$). Las lecturas del NDVI del CC fueron menores a las del GS a partir de los 60 días después de plantación (ddp). La relación entre el NDVI relativo (RNDVI) con el N disponible (N a la plantación + dosis de N) se asoció significativamente a partir de los 60 ddp para el CC ($R^2 = 0,85, 0,91$ y $0,65$ para los 60, 80 y 100 ddp; respectivamente) y de los 80 ddp para el GS ($R^2 = 0,72$ y $0,76$ para los 80 y 100 ddp; respectivamente). El umbral de suficiencia de N promedio del RNDVI fue de 99,4% y 99,7% para el GS y CC; respectivamente. En general, los modelos de predicción del estrés de N variaron con el sensor y se determinó que el CC fue más sensible que el GS para determinar el estrés de N en etapas intermedias del ciclo del cultivo.

Palabras clave. GreenSeeker 506, CropCircle ACS 210.

CHARACTERIZING NITROGEN STRESS IN PROCESSING POTATO USING NDVI

ABSTRACT

Measuring the reflectance with optical sensors has the potential to provide information about the nitrogen (N) status during the potato growing season and it could predict the N rate. The objectives were to evaluate the N status using optical sensors, GreenSeeker 506 (GS) and CropCircle ACS 210 (CC), compare them and provide algorithms to define N sufficiency thresholds. Three field experiences with variable N rate were carried out during the 2009/10, 2010/11 and 2012/13 growing seasons. Potato yield increased with N fertilization and this varied from one growing season to the other. The relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) of the two sensors was significant along the growing season with large determination coefficient values ($R^2 = 0.74$ to 0.99).

Measured NDVI values by CC was lower than by GS from 60 days after plantation (dap). The relationship between relative NDVI with the available N (N at planting + N rate) were significantly associated from 60 dap for CC ($R^2 = 0.85$ and 0.91 0.65 ; for 60, 80 and 100 dap, respectively) and from 80 dap for the GS ($R^2 = 0.72$ and 0.76 for the 80 and 100 dap, respectively). The average sufficiency N threshold was 99.4% and 99.7% for the GS and CC; respectively. In general, predictive models of the N stress varied according to the used sensor, and it was determined that the CC was more sensitive than the GS to determine N stress.

Key words. GreenSeeker 506, CropCircle ACS 210, optimum N rate.

¹ Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Mar del Plata

² INTA-Balcarce

* Autor de contacto: giletto.claudia@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es el cuarto cultivo alimenticio más importante después del arroz, el trigo y el maíz y su tubérculo ha contribuido históricamente en la seguridad alimentaria y nutricional en el mundo (FAO 2015). En la Argentina, el sudeste bonaerense es una de las principales zonas destinadas al cultivo de papa, con una participación estimada del 47% de la producción nacional y un promedio de 32.867 hectáreas plantadas para la campaña 2014/15. De esta superficie, aproximadamente el 40% se destina a la industria, siendo Innovator la variedad más difundida (Argenpapa, 2015). Los mayores efectos sobre el rendimiento se producen ante variaciones de nitrógeno (N), debido a que tanto la deficiencia como el exceso de N reducen el rendimiento (Goffart *et al.* 2008; Zebarth *et al.*, 2012). El exceso de N puede afectar la calidad de los tubérculos para industria por presentar mayor concentración de nitrato y menor contenido de materia seca (Giletto *et al.*, 2011) y producir efectos adversos sobre el ambiente por aumento de la cantidad de N que se pierde del sistema (Giletto & Echeverría, 2013). Por lo tanto, para realizar un uso racional del N es necesario desarrollar métodos de monitoreo en planta que determinen el estatus de N durante el ciclo; estos métodos tienen la ventaja de ser sensibles a los cambios en la disponibilidad de N, las condiciones climáticas y el manejo del cultivo (Ziadi *et al.*, 2012).

En los últimos años, el desarrollo e investigación de los sensores ópticos como métodos de diagnóstico de N ha logrado un progreso significativo (Samborski *et al.*, 2009). Las mediciones realizadas por los sensores permiten calcular diferentes índices, siendo el más empleado el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI); que relaciona la reflectancia en el rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, el primero se asocia con la absorción de la clorofila y el segundo con la cobertura del canopeo (Shanahan *et al.*, 2001; Martin *et al.*, 2007). La deficiencia de N disminuye la concentración de clorofila en las hojas, lo que resulta en un aumento de la reflectancia de la hoja en el rango visible del espectro (Daughtry *et al.*, 2000) y una disminución de la reflectancia en el infrarrojo, los que resulta en un bajo valor de NDVI. En papa, Wang & Rosen (2003) y Goffart (2005) determinaron que los valores del NDVI se asociaron con el desarrollo del canopeo y aumentaron ante dosis crecientes de N. Bowen *et al.* (2005) evaluaron el NDVI a lo largo del ciclo del cultivo y mostraron que el NDVI se asoció con el N disponible en el suelo sólo al inicio del ciclo del cultivo. Jain *et al.* (2007)

midieron el NDVI a los 40 y 60 días después de la plantación y determinaron que el índice aumentó con la dosis de N. Contrariamente, Yu *et al.* (2013) concluyen que las lecturas del NDVI fueron pobremente correlacionados con el N del suelo en la etapa de crecimiento vegetativo debido a la influencia del suelo sobre la lectura del NDVI. En el suelo, los valores medidos de NDVI son menores que en un cultivo, debido a la menor reflectancia de la luz en todas las longitudes de onda. En Balcarce, Martín (2010) determinó diferencias en el NDVI entre los tratamientos que recibieron dosis de N durante la etapa de crecimiento vegetativo y de llenado de tubérculos. Estas referencias muestran que el NDVI permitió determinar diferencias debidas a la disponibilidad de N, pero, no establecieron umbrales de suficiencia de N a partir del NDVI.

El GreenSeeker 506 (GS) (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA) y el CropCircle ACS-210 (CC) (Holland Scientific Lincoln, NE) son sensores activos que calculan el NDVI (Samborski *et al.*, 2009). Schepers (2008) determinó que cuando se cierra el canopeo, el NDVI del GS se satura y el NDVI del CC es más útil para determinar el estado nutricional. Existen pocos estudios que analicen las diferencias entre los sensores (Tremblay *et al.*, 2009); entre estos Sudduth *et al.* (2010) evaluaron al GS y CC para determinar el nivel de N en maíz y concluyeron que las lecturas de ambos sensores se correlacionaron estrechamente y que el NDVI fue sensible a los cambios del canopeo por efecto de N. Similares resultados fueron determinados por Raper *et al.* (2013) en algodón. En papa no existen antecedentes que muestren cuál de los dos sensores es más sensible para determinar diferencias en cobertura debidas a la disponibilidad de N y si el NDVI permite definir la dosis de N para cubrir deficiencias del nutriente. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivos: 1) evaluar el estrés de N a lo largo del ciclo del cultivo utilizando sensores ópticos, 2) comparar los valores de NDVI determinados con los sensores GS y CC, y 3) proporcionar algoritmos que pueden utilizarse para definir umbrales de suficiencia de N.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron tres experiencias a campo en las campañas agrícolas 2009/10, 2010/11 y 2012/13 en el partido de General Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina (37°50' 47" S 58°15' 19" O, 130 m snm 870 mm precipitación media anual; 13,7 °C temperatura media anual). Los suelos se clasificaron como Argiudol Típico (USDA suelo taxonomía 2008) serie Mar del Plata, con 24% de arcilla, 33% limo y 43% de arena, con

una profundidad efectiva mínima de 1,5 m. La Tabla 1 muestra las características del suelo de cada ensayo.

Previo a la plantación del cultivo se tomaron muestras de suelo a 0-20 y 20-40 cm de profundidad. En las muestras superficiales (0-20 cm) se determinó el contenido de materia orgánica (MO), pH y contenido de N-nitrato (N-NO_3^-) (Nini). En las muestras sub-superficiales (20-40 cm) sólo se determinó N-NO_3^- (Tabla 1). El N-NO_3^- del suelo se extrajo con KCl 2 M y determinó por colorimetría utilizando un espectrofotómetro UV-VIS (Keeney & Nelson, 1982). La MO se determinó por el método de Walkley & Black (1934), el pH se midió con electrodo en una suspensión 1:2,5 (suelo-agua) y el fósforo disponible (0-20 cm) por el método de Bray & Kurtz 1 (1945). La evapotranspiración potencial (ETP) y las precipitaciones fueron obtenidas de la estación meteorológica de la Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Balcarce (INTA) (Tabla 1), distante a unos 15 km de cada sitio experimental.

Las fechas de plantación fueron el 29/10/09, 12/11/11 y 31/10/13. Se utilizó la variedad apta para industria Innovator (medio-tardío, 120-130 días de ciclo). Se utilizó un diseño en bloques completos y aleatorizados con tres repeticiones. Los tratamientos de N, dosis y momento de fertilización nitrogenada se muestran en la Tabla 2. La fuente de N fue urea granulada $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$, la que se aplicó al voleo y se incorporó con 10 mm de agua de riego. Para que el fósforo (P) no fuera limitante, se aplicaron 50 kg P ha^{-1} a la plantación como superfosfato triple de calcio (NPK: 0-20-0). El tamaño de cada unidad experimental fue de 6 surcos de 0,85 m y 5 m de largo. La plantación se realizó con una sembradora de dos surcos con 0,85 m de ancho entre surcos y una densidad media de 5 papas "semillas" por metro de surco. El riego se realizó con un equipo de avance frontal, Reinke Electrogator II (Reinke Deshler-Nebraska EE.UU.); éste se inició a los 40-45 días después de la plantación (ddp) y continuó hasta el final del ciclo. Al comparar

el agua suministrada, entre precipitaciones y riego y la evapotranspiración potencial (Tabla 1), la cantidad de agua que recibió el cultivo no afectó el normal desarrollo del mismo (Echeverría *et al.*, 1992; Suero *et al.*, 2001). El control de malezas, plagas y enfermedades fueron realizadas mediante control mecánico y químico (Caldiz, 2006).

Se realizaron muestreos de planta entera, las fechas fueron el 9/12, 29/12, 14/01 y 5/02 para el 2009/10, el 20/12, 18/01, 4/02 y 24/02 para el 2010/11, el 27/12, 21/01 y 07/02 para el 2012/13. Para cada campaña, las fechas de muestreo corresponden a las etapas de crecimiento vegetativo, inicio de tuberización, llenado de tubérculos y maduración; respectivamente. En cada muestreo se cosechó 1 m lineal de un surco elegido al azar de cada unidad experimental. Cada muestra se separó en parte aérea y tubérculos, se pesó en fresco y en seco. Para esto las dos fracciones de la planta se llevaron a estufa a 60°C por 24 h o hasta peso constante. La producción de biomasa total en peso seco se determinó por la suma de ambas fracciones y se expresó en Mg ha^{-1} . La cosecha del cultivo se realizó el 02/03, el 29/03 y el 05/03 para las campañas 2009/10, 2010/11 y 2012/13, respectivamente. Para ello, se cosecharon en forma manual dos metros lineales de los dos surcos centrales de cada parcela y se realizaron estimaciones del rendimiento de tubérculos en peso fresco.

Los sensores activos utilizados para determinar el estrés de N fueron el GreenSeeker 506 (GS), y CropCircle ACS-210 (CC) (Holanda Científico, Lincoln, NE). Las mediciones se realizaron en los dos surcos centrales de cada unidad experimental a una velocidad constante de $1,3 \text{ m s}^{-1}$ y la distancia por encima del canopeo de 80 cm. El NDVI del GS se calcula con la reflectancia en el rojo ($650 \pm 10 \text{ nm}$) e infrarrojo ($770 \pm 15 \text{ nm}$) (Schepers, 2008). El NDVI del CC se calcula con la reflectancia en las longitudes de onda amarillo (590 nm) e infrarrojo (880 nm). Las mediciones del NDVI con ambos sensores fueron realizadas en diferentes momentos del ciclo

Tabla 1. Información de manejo del cultivo de papa, cultivo antecesor, características de los suelos, lluvias más riego (LL+R) y evapotranspiración potencial (ETP) durante el ciclo de crecimiento en las campañas 2009/10, 2010/11 y 2012/13. El valor entre paréntesis es el desvío estándar.

Table 1. Management information of potato crops, previous crop, soil characteristics, , rainfall plus irrigation (R+I) and potential evapotranspiration (PET) during 2009/10, 2010/11 and 2012/13 growing seasons. Value of standard deviation is between parentheses.

Campaña agrícola	Fecha fertilización con N			CA [§]	MO (0-20 cm) g 100 g ⁻¹	pH (0-20 cm)	P-Bray1 (0-20 cm) mg kg ⁻¹	NO ₃ -N (0-40 cm) kg ha ⁻¹	LL+R mm	ETP mm
	Pl.	Ap.	LT							
2009/10	29 oct	9 dic	-	Pastura	5,4 (0,4)	6,05 (0,01)	14,2 (1,6)	38,5 (16,0)	637	759
2010/11	12 nov	20 dic	-	Pastura	5,4 (0,7)	6,19 (0,05)	8,6 (1,7)	53,9 (7,5)	707	622
2012/13	31 oct	11 dic	8 ene	Soja	4,0 (0,1)	6,58 (0,06)	25,2 (0,4)	10,8 (2,3)	697	652

[§]CA: cultivo antecesor; MO: materia orgánica; Pl.: plantación; Ap.: aporte; LT: llenado de tubérculos.

Tabla 2. Dosis, momento de aplicación de nitrógeno (N) y N total aplicado en cada tratamiento.

Table 2. Rate, timing and total nitrogen (N) applied to each treatment.

Plantación	Dosis de N		N total aplicado	
	Aporque	Llenado de tubérculos		
	(kg ha ⁻¹)			
0	-	-	-	0
50	0	-	-	50
50	50	-	-	100
50	100	-	-	150
50	150	-	-	200
50	100	100	-	250
50	150	100	-	300

del cultivo, coincidiendo con las fechas de los muestreos de planta, en etapa de crecimiento vegetativo (\cong 40 DAP), inicio de tuberización (\cong 60 DAP), llenado de tubérculos (\cong 80 DAP) y maduración (\cong 100 DAP) (Westermann, 1993).

Los análisis estadísticos fueron realizados con el software SAS (SAS Institute, 2002). La respuesta del NDVI para cada sensor y del rendimiento a la dosis de N se realizó utilizando el procedimiento PROC MIXED incluido en el programa Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 2002) ($p \leq 0,05$), considerando a la dosis de N como efecto fijo y a las repeticiones y campaña como efectos aleatorios. Se relacionó al rendimiento con el N disponible (Nini + dosis de N) en cada campaña agrícola ajustando la función cuadrática con el procedimiento PROC NLIN. A partir de esta función se determinó la cantidad mínima de N (Nini + dosis de N) necesaria para alcanzar el máximo rendimiento. Para cada sensor, se determinaron coeficientes de correlación de Pearson (r) a partir de la relación obtenida entre el NDVI con la producción de biomasa y con el rendimiento de los tubérculos. Se estableció la relación del NDVI de ambos sensores en cada fecha de muestreo y se ajustaron funciones lineales con el procedimiento PROC REG. Se calculó al NDVI relativo (RNDVI) de cada tratamiento como la relación entre el NDVI promedio del

tratamiento y el NDVI promedio del tratamiento con mayor dosis de N. Se determinó la relación entre el RNDVI con el N disponible (Nini + dosis de N) para cada sensor y se ajustaron funciones de regresión cuadrática y cuadrática-meseta utilizando PROC NLIN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento varió por efecto de la interacción entre los tratamientos de N y campaña agrícola para la variable rendimiento de tubérculos ($p < 0,05$). Por lo que, la respuesta del rendimiento a la dosis de N fue evaluada en cada campaña agrícola. El rendimiento promedio de tubérculos varió desde 52,3 hasta 64,5 Mg ha⁻¹ y se determinó respuesta significativa en el rendimiento a la fertilización nitrogenada en cada campaña agrícola (Tabla 3). El rendimiento de tubérculos fue similar al obtenido por los agricultores de esta región (Caldiz, 2006). Además, el modelo cuadrático determinado a partir de la relación entre el rendimiento y el N disponible fue significativo en todos los sitios experimentales (Tabla 4) y la cantidad mínima de N necesaria para alcanzar el máximo rendimiento varió desde 136 hasta 180 kg N ha⁻¹. Ésta fue variable entre sitios, probablemente debido a la variación en el aporte de N del suelo; controlado principalmente por la cantidad de N que se mineraliza desde la materia orgánica (Zebarth *et al.*, 2012).

El NDVI determinado con ambos sensores varió por efecto de la interacción entre la campaña agrícola y el tratamiento de N en todas las fecha de muestreo ($p < 0,05$). Por lo tanto, la respuesta del NDVI a la dosis de N fue analizada en cada campaña agrícola (Tabla 5). Los valores promedio de NDVI variaron de 0,675 a 0,865 para el GS y de 0,582 a 0,792 para el CC (Tabla 5). Para el GS, el NDVI aumentó progresivamente hasta que el cultivo cerró el surco y posteriormente disminuyó en función de la senescencia de la biomasa aérea, determinándose los valores máximos

Tabla 3. Estadística descriptiva de rendimiento de tubérculos para cada campaña agrícola.

Table 3. Descriptive statistics of tuber yield for each growing season.

Campaña agrícola	Rendimiento de tubérculos						CME
	Valor P	Media	Mínimo	Máximo	CV [§]	R ²	
		----- (Mg ha ⁻¹) -----				%	
2009/10	0,001 ¹	58,1	54,8	61,5	3,63	0,72	4,5
2010/11	0,013	64,8	59,6	70,0	6,21	0,58	16,2
2012/13	0,005	52,3	46,1	58,5	7,25	0,78	14,4

¹Significativo a $p \leq 0,05$. [§]CV: coeficiente de variación; R²: coeficiente de determinación; CME: cuadrado medio del error.

Tabla 4. Coeficientes del modelo cuadrático obtenidos a partir de la relación entre el rendimiento (y) y el N disponible (N a la plantación + dosis de N) (x), y la cantidad mínima de N (N a la plantación + dosis de N) necesaria para alcanzar el máximo rendimiento (NmáxR) obtenida a partir del modelo de regresión para cada campaña agrícola.

Table 4. Coefficients of quadratic regression of relationship between yield (y) and N available (N at planting + N rate) (x) and minimum amount of N (N at planting + N rate) required to achieve maximum yield (NmáxR) calculated by quadratic regression models for each growing season.

Campaña agrícola	Valor P	c [§]	b	a	R ²	CME	NmáxR (kg N ha ⁻¹)
2009/10	0,0002 ¹	-0,0006 (2,0x10 ⁻⁴)	0,191 (0,05)	46,25 (2,43)	0,68	4,02	159
2010/11	0,006	-0,0006 (1,7x10 ⁻⁴)	0,163 (0,04)	55,53 (2,65)	0,49	2,89	136
2012/13	0,0002	-0,0005 (5,1x10 ⁻⁵)	0,180 (0,03)	41,92 (2,37)	0,67	14,21	180

¹significativo a p ≤ 0,05

[§]c: coeficiente cuadrático; b: coeficiente lineal; a: ordenada al origen; R²: coeficiente de determinación; CME: cuadrado medio del error. Los valores entre paréntesis son el error estándar de los coeficientes de la función cuadrática.

Tabla 5. Estadística descriptiva del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) para cada campaña agrícola medidos con el GreenSeeker 506 (GS) y CropCircle ACS-210 (CC).

Table 5. Descriptive statistics of normalized differential vegetation index (NDVI) for each growing season measured with the GreenSeeker 506 (GS) y CropCircle ACS-210 (CC).

Campaña agrícola	NDVI								
	Sensor	ddp	Valor P	Media	Mínimo	Máximo	CV [§]	R ²	CME
2009/10	GS	40	0,733 ¹	0,748	0,734	0,762	10,34	0,18	0,01
		60	0,217	0,865	0,860	0,870	0,51	0,67	1,9x10 ⁻⁵
		80	0,005	0,823	0,811	0,835	0,93	0,89	5,8x10 ⁻⁵
		100	0,478	0,802	0,790	0,814	2,81	0,54	5,1x10 ⁻⁴
	CC	40	0,921	0,792	0,781	0,802	5,23	0,18	1,7x10 ⁻³
		60	-	-	-	-	-	-	-
		80	0,0003	0,667	0,650	0,684	1,14	0,95	5,8x10 ⁻⁵
		100	0,535	0,595	0,582	0,608	4,43	0,52	6,9x10 ⁻⁴
2010/11	GS	40	0,012	0,675	0,661	0,690	1,41	0,86	1,4x10 ⁻⁴
		60	0,224	0,847	0,843	0,850	0,73	0,66	3,8x10 ⁻⁵
		80	0,005	0,853	0,847	0,859	0,79	0,89	4,6x10 ⁻⁵
		100	0,018	0,846	0,820	0,872	2,56	0,84	4,7x10 ⁻⁴
	CC	40	0,030	0,673	0,655	0,690	2,51	0,82	2,9x10 ⁻⁴
		60	0,023	0,749	0,737	0,762	1,79	0,84	1,8x10 ⁻⁴
		80	0,002	0,738	0,720	0,757	1,41	0,92	1,1x10 ⁻⁴
		100	0,017	0,656	0,618	0,693	4,40	0,85	8,3x10 ⁻⁴
2012/13	GS	40	0,493	0,783	0,767	0,798	2,11	0,64	2,7x10 ⁻⁴
		60	0,404	0,826	0,821	0,831	0,99	0,32	6,7x10 ⁻⁵
		80	0,011	0,855	0,838	0,871	1,23	0,78	1,1x10 ⁻⁴
		100	0,045	0,775	0,733	0,817	5,26	0,65	1,6x10 ⁻³
	CC	40	0,866	0,711	0,701	0,721	3,09	0,26	4,9x10 ⁻⁴
		60	0,039	0,720	0,705	0,734	1,30	0,59	8,8x10 ⁻⁵
		80	0,002	0,700	0,673	0,727	1,99	0,86	1,9x10 ⁻⁴
		100	0,0001	0,582	0,535	0,628	3,04	0,92	3,2x10 ⁻⁴

¹significativo a p ≤ 0,05

[§]CV: coeficiente de variación, R²: coeficiente de determinación; CME: cuadrado medio del error.

a los 80 ddp. Para el CC, los valores de NDVI fueron elevados a los 40 y 60 ddp y menores a partir de los 80 ddp.

La relación entre los valores de NDVI medidos con ambos sensores ópticos en cada etapa del ciclo del cultivo se muestra en la Figura 1. Los análisis de regresión para los modelos lineales fueron significativos con elevados valores de determinación ($R^2 = 0,74-0,99$). A los 40 ddp, la relación entre los índices coincidió con la línea 1:1 de inclinación; mientras que, para el resto de las fechas de muestreo, las relaciones estuvieron por debajo de la línea 1:1. Esto muestra que las lecturas del NDVI medidas con CC fueron menores a los del GS, especialmente desde que el cultivo cierra el surco. Esta diferencia puede ser explicada

por las longitudes de onda que utiliza cada sensor para calcular el índice. Jain *et al.* (2007), en papa determinaron que las plantas reflejan más luz a 590 nm y menor a 650 nm y similar cantidad de luz de la región infrarroja. Contrariamente, Raper *et al.* (2013) estableció que las plantas verdes y sanas de algodón reflejan similar cantidad de luz de la región visible del espectro y reflejan más luz a 880 nm que a 770 nm de la región infrarroja. A pesar de las diferencias entre autores, en ambos casos, el CC dará valores de NDVI menores que el GS. Mientras que, en etapas tempranas del ciclo (40 ddp), el canopeo del cultivo aún no cerró el surco; y probablemente la reflectancia desde la superficie del suelo contribuya en mayor proporción sobre

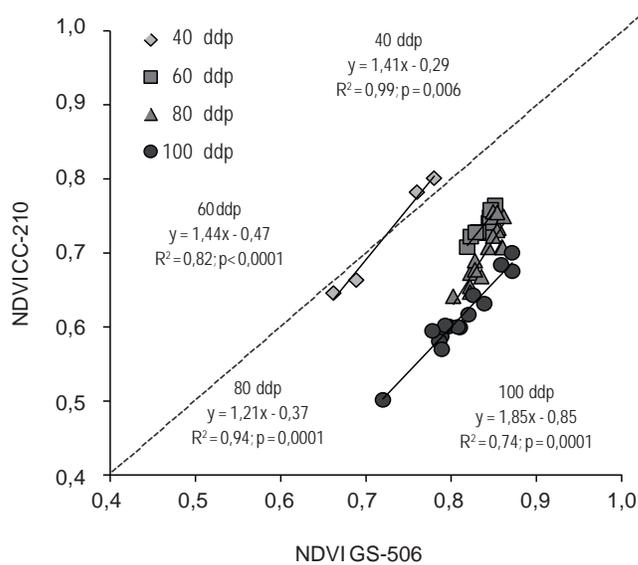


Figura 1.

Relación entre los valores de índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) obtenido con los sensores GreenSeeker 506 (GS) y CropCircle ACS-210 (CC) a los 40, 60, 80 y 100 días después de la plantación (ddp) del cultivo de papa.

Figure 1.

Relationship between normalized differential vegetation index (NDVI) with GreenSeeker 506 (GS) and CropCircle ACS-210 (CC) sensors at 40, 60, 80 and 100 days after the planting (ddp) of potato crop.

Días después de plantación	Sensor	Coeficiente de correlación	
		Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)
40	GS	0,99***	ns
	CC	0,97***	ns
60	GS	ns	ns
	CC	0,61**	0,78***
80	GS	0,65**	0,52**
	CC	0,56**	0,73**
100	GS	0,61**	0,86***
	CC	0,55**	0,83***

***significativo $p \leq 0,0001$; **significativo $p \leq 0,05$; ns: no significativo.

Tabla 6.

Coeficiente de correlación de Pearson (r) de la relación entre el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) con los sensores GreenSeeker 506 (GS) y CropCircle ACS-210 (CC) y la biomasa total o el rendimiento del cultivo de papa.

Table 6.

Pearson correlation coefficient (r) for the relationship between the normalized differential vegetation index (NDVI) with GreenSeeker sensors 506 (GS) and CropCircle ACS-210 (CC) and biomass production or potato tubers yield.

la lectura del NDVI que la reflectancia desde el canopeo del cultivo y por ello fueron similares los valores de NDVI con ambos sensores. Major *et al.* (2003) indicaron que, cuando un cultivo no cierra el surco, la reflectancia del suelo es determinante en la reflectancia total, y que puede variar por efecto de la labranza, contenido de humedad y materia orgánica del suelo.

En general, la biomasa total correlacionó con el NDVI en todas la fechas de muestreo, excepto a los 60 ddp con el GS (Tabla 6). Los coeficientes de correlación de Pearson (r) tendieron a disminuir a medida que avanzó el ciclo de cultivo. Por otro lado, el rendimiento correlacionó con el NDVI del CC a partir de los 60 ddp y con el GS a partir de los 80 ddp. Similares resultados fueron determinados en

maíz y algodón por Martin *et al.* (2007) y Raper *et al.* (2013); respectivamente. Los resultados permiten inferir que, el CC fue más sensible que el GS a los cambios de cobertura del follaje de papa en etapas tempranas del ciclo.

Los valores absolutos de NDVI variaron con la campaña, fecha de muestreo y sensor por lo que se relativizaron los valores de NDVI (RNDVI) (Schepers *et al.*, 1992; Scharf *et al.*, 2006; Hawkins *et al.*, 2007). Los modelos de regresión obtenidos de la relación entre el RNDVI de ambos sensores y el N disponible fueron significativos a partir de los 80 ddp con el GS y de los 60 ddp con el CC (Fig. 2). Hasta los 80 ddp, el término cuadrático de la regresión (coeficiente c) y el coeficiente de determinación fueron mayores con el CC que con el GS. Por lo que, el CC fue más sensible que

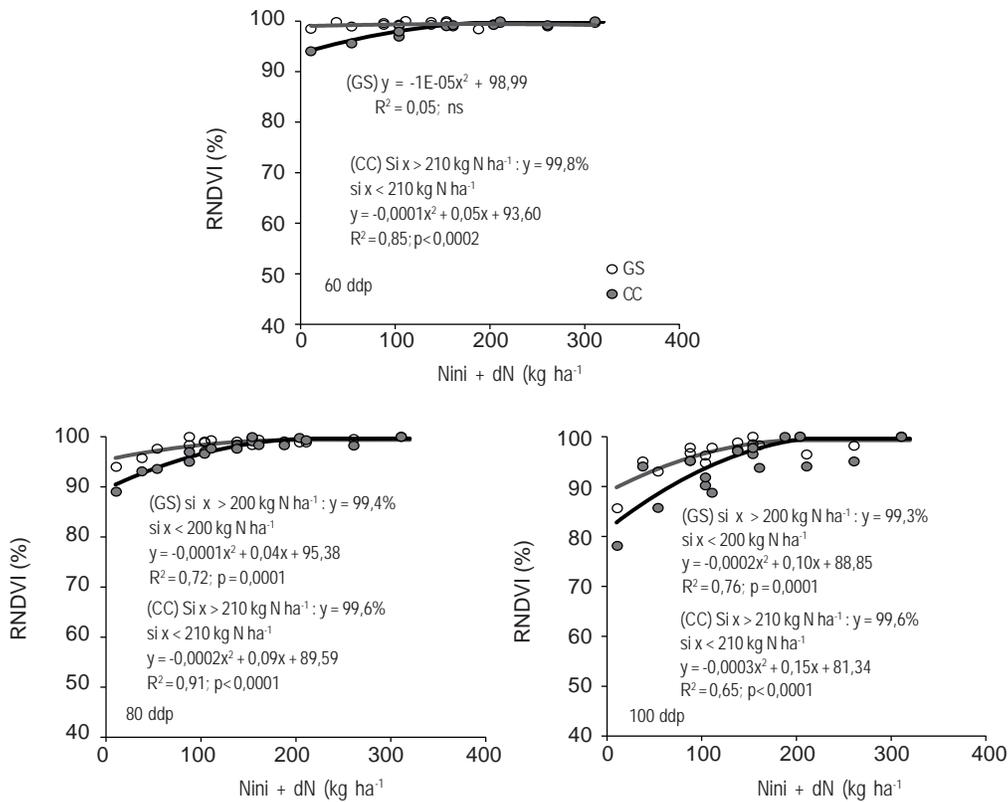


Figura 2. Relación entre el relativo índice de vegetación diferencial normalizado (RNDVI) y el nitrógeno disponible (Nini + dN) obtenida con los sensores GreenSeeker 506 (GS) y CropCircle ACS-210 (CC) a lo largo del ciclo del cultivo de papa (60, 80 y 100 días después de la plantación (ddp)). N a la plantación: Nini; Dosis de N: dN.

Figure 2. Relationship between relative normalized differential vegetation index (RNDVI) and with nitrogen available (Nini + dN) obtained from GreenSeeker 506 (GS) and CropCircle ACS-210 (CC) sensors along potato growing season (60, 80 and 100 days after the planting (ddp)). N at planting: Nini; N rate: dN.

el GS para determinar el estrés de N en el cultivo de papa, aún en etapas tempranas del ciclo. Clay *et al.* (2006) y Spripada *et al.* (2008) evaluaron varios índices espectrales y concluyeron que el NDVI calculado con la longitud de onda visible más cerca del verde (590 nm) fue mejor para predecir el estrés de N que cuando el NDVI se calculó con la longitud de onda roja. Esto es debido a que, la reflectancia a 590 nm discrimina mejor los tratamientos que recibieron diferente dosis de N que a 690 nm (Fox & Walthall, 2008). El NDVI del GS tiene la limitación que se satura cuando el cultivo alcanza el máximo índice de área foliar, asociado a la menor sensibilidad de la reflectancia en el rojo para evaluar el estrés de N (Gitelson *et al.*, 1996). El umbral de suficiencia de N promedio del RNDVI fue del 99,4% y 99,7% para el GS y CC, respectivamente. Estos resultados permiten inferir que ambos equipos pueden ser utilizados para corregir deficiencias de N. Sin embargo, el CC es más promisorio que el GS para determinar el estrés de N a partir de la etapa de inicio de tuberización (60 ddp). La implementación en la práctica de esta metodología exige contar con una franja de referencia con N no limitante para el cultivo.

CONCLUSIONES

Para las condiciones en las que se realizó esta experiencia, el NDVI permitió ajustar modelos de regresión para predecir umbrales de suficiencia de N durante el ciclo. Por otro lado, al comparar los sensores, el CC fue más sensible que el GS para determinar el estrés de N en el cultivo de papa en etapas tempranas del ciclo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte de los resultados de la tesis de Claudia Giletto para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. Este estudio fue financiado por los proyectos FCA-UNMP AGR 447/14 y AGR 474/15.

BIBLIOGRAFIA

- Argenpapa. 2015. <http://www.argenpapa.com.ar> [consulta: diciembre 2015].
- Bowen, TR; BG Hopkins; JW Ellsworth, AG Cook & SA Funk. 2005. In-season variable rate n in potato and barley production using optical sensing instrumentation. Western Nutrient Management Conference. Vol 6. Salt Lake City, UT.
- Bray, RH & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59: 39-45.
- Caldiz, DO. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. Buenos Aires, Argentina. 226 p.
- Clay, DE; KI Kim; J Chang; SA Clay & K Dalsted. 2006. Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. *Agron. J.* 98: 579-587.
- Daughtry, CST; CL Walthall; MS Kim; E Brownde Colstrom & JE McMurtrey. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration for leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.* 74: 229-239.
- Echeverría HE; EE Suero & FH Andrade. 1992. Radiación, temperatura, nutrientes, y agua como determinantes de la producción del cultivo de papa. *Boletín técnico* 103. 1-20. EEA Inta Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- FAO. 2015. <http://www.fao.org> [consulta Julio 2015].
- Fox, RH & CL Walthall. 2008. Crop Monitoring Technologies to Assess Nitrogen Status. In: Nitrogen in agricultural systems. Agron. Monogr. 49. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. pp: 675-6694.
- Giletto, CM; JE Rattin; HE Echeverría & DO Caldiz. 2011. Requerimiento de nitrógeno para alcanzar máximo rendimiento y calidad en variedades industriales de papa. *Revista Facultad de Ciencias Agrarias Cuyo.* 43(1): 85-95.
- Giletto, CM & HE Echeverría. 2013. Nitrogen balance for potato crops in the southeast pampas region, Argentina. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 95: 73-86.
- Gitelson, AA; YJ Kaufman & MN Merzlyak. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58: 289-298.
- Goffart, JP. 2005. Crop light reflectance to assess potato crop nitrogen status. 16 th Triennial Conference of the European Association for Potato Research. Bilbao, Basque Country. pp. 342-345.
- Goffart, JP; M Olivier & M Frankinet. 2008. Potato Crop Nitrogen Status Assessment to Improve N Fertilization Management and Efficiency: Past-Present-Future. *Potato Res* 51: 355-383.
- Hawkins, JA; JE Sawyer; DW Barker & JP Lundvall. 2007. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn. *Agron. J.* 99: 1034-1040.
- Jain, N; Ray SS; Singh JP & Panigrahy S. 2007. Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agric.* DOI 10.1007/s11119-007-9042-0.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Miller RH & DR Keeney (eds). *Methods of soil analysis*, 2nd edition, 643-698. American Society Agronomy, Madison, WI.
- Martin, C. 2010. Índice de vegetación diferencial normalizado como estimador del nivel de nitrógeno en papa. Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo.
- Major, DJ; R Baumeister; A Touré & S Zhao. 2003. Methods of measuring and characterizing the effects of stresses on leaf and canopy signatures. In: VanToai T; M Major; M McDonald; J Schepers & L Tarpley (eds) *Digital imaging and spectral techniques: applications to precision agriculture and crop physiology*. ASA special publication n 66. 81-93. American Society Agronomy, Madison, WI.
- Martin, KL; K Girma; KW Freeman; RK Teal; B Tubana; DB Arnall; B Chung; O Walsh; JB Solie; ML Stone & WR Raun. 2007. Expression of variability in corn as influenced by growth stage using optical sensor measurements. *Agron. J.* 99:384-389.

- Raper, TB; JJ Varco; & KJ Hubbard. 2013. Canopy-Based Normalized difference Vegetation Index Sensors for Monitoring Cotton Nitrogen Status. *Agron. J.* 105: 1345-1354.
- Samborski, SM; N Tremblay & E Fallon. 2009. Strategies to Make Use of Plant Sensors-Based Diagnostic Information for Nitrogen Recommendations. *Agron. J.* 101(4): 800-816.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release version 9.0. SAS Inst., Cary, NC.
- Scharf, PC; SM Brouder & RG Hoef. 2006. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the North-Central USA. *Agron. J.* 98: 655-665.
- Schepers, J; T Blackmer & D Francis. 1992. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: Using chlorophyll meters. *In: Predicting fertilizer needs for corn in humid regions*, ed. B. Bock y K. Kelly 105-114. NFERC, Bull. Y-226. Muscle Shoals, AL, EE.UU.
- Schepers, JS. 2008. Active sensor tidbits. <http://www.isafarmnet.com/08OFNConfPresent/Nitrogen>. [Consulta: mayo 2009].
- Shanahan, JF; JS Schepers; DD Francis; GE Varvel; WW Wilhelm; JM Tringe; MR Schlemmer & DJ Major. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agron J.* 93: 583-589.
- Sripada, RP; JP Schmidt; AE Dellinger & DB Beegle. 2008. Evaluating Multiple Indices from a Canopy Reflectance Sensor to Estimate Corn N Requirements. *Agron. J.* 100: 1553-1561.
- Sudduth, KA; NR Kitchen & ST Drummond. 2010. Comparison of three canopy reflectance sensors for variable-rate nitrogen application in corn. *In: Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture*, Denver, CO. 18-21 July, 2010. Int. Plant Nutrition Inst., Foundation for Agron. Res., and Colorado State Univ., Boulder. CD-ROM.
- Suero EE; JN Santa Cruz; A Silva Busso; AI Della Maggiora; AI Irigoyen; JL Costa & JM Gardiol. 2001. Caracterización de los recursos naturales en sistemas bajo riego del sudeste bonaerense. Bases para propuestas de aplicación sustentable del riego. *RIA* 30(1): 71-90.
- Tremblay, N; Z Wang; BL Ma; C Belec & P Vigneault. 2009. A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. *Precis. Agric.* 10: 145-161.
- USDA Soil Classification. 2008. Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation service, United States Department of Agriculture. Official Soil Series Descriptions.
- Walkley, A & A Black. 1934. An examination of the degtjarett method of determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Wang, D & CJ Rosen. 2003. Determining growth and yield limiting factors in potato from canopy spectral reflectance. *In: W Gao & DR Shaw (eds). Ecosystems' dynamics, agricultural remote sensing and modeling, and site specific agriculture.* 5153: 109-118. Proceedings of SPIE.
- Westermann, DT. 1993. Fertility Management. *In: Rowe, RC (ed). Minnesota, USA. Potato. Health Management.* pp: 77-86.
- Yu, J; F Li; YL Qin & MS Fan. 2013. Active crop canopy sensor-based nitrogen diagnosis for potato. *Spectroscopy and Spectral Analysis* 33(11): 3092-3097.
- Zebarth, BJ; G Belanger; AN Cambouris & N Ziadi. 2012. Nitrogen fertilization strategies in relation to potato tuber yield, quality and crop N recovery. *In: Zhonggi, H; R Larkin & W Honeycutt (eds). Sustainable potato production: global case studies.* pp: 165-186. USA.
- Ziadi, N; BJ Zebarth; G Belanger & AN Cambouris. 2012. Soil and plant tests to optimize fertilizer nitrogen management of potato. *In: Zhonggi, H; R Larkin & W Honeycutt (eds). Sustainable potato production: global case studies.* pp: 187-207. USA.

