

ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA ESTIMAR EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.) ESTRESADAS POR DEFICIENCIA DE AGUA Y NITRÓGENO

Vegetation Index to Estimate the Growth of Tomato Plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Stressed by Water and Nitrogen Deficiencies

Ruiz Salazar José Guadalupe^{1‡}, Leonardo Tijerina Chávez¹, Enrique Mejía Sáenz², Manuel Sandoval Villa², Prometeo Sánchez García², Humberto Vaquera Huerta² y María Teresa Colinas León¹

RESUMEN

Se propusieron y evaluaron tres índices de vegetación (IV): clorofila total (CLT); relación infrarrojo medio e infrarrojo cercano (IRMYC) y relación infrarrojo cercano con azul (IRA), formulados con las bandas espectrales azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, con el fin de estimar el crecimiento de plantas de tomate, variedad Río Grande, estresadas por deficiencia de agua y nitrógeno, en forma remota. La evaluación se realizó, en invernadero, en función de su capacidad para estimar los cambios en indicadores de crecimiento (IC): índice de área foliar y materia seca del follaje, en ocho muestreos. Ambos IC se estimaron por todos los IV, desde el primero hasta el cuarto muestreo, 36 días después del trasplante; luego, la reflectancia, en las bandas del espectro visible, prácticamente, no cambió y los IV, formulados con estas bandas (CLT e IRA), tampoco; esto limitó su valor de predicción en los muestreos siguientes. El índice IRMYC fue el mejor para estimar a los IC, debido a que las bandas que lo componen corresponden al espectro infrarrojo, cuya saturación es más lenta que las del espectro visible. También fue mejor que el IV de diferencia normalizada IVDN, utilizado como referencia.

Palabras clave: reflectancia espectral, fertirrigación, invernadero.

SUMMARY

Three vegetation indexes (VI) were proposed and evaluated: total chlorophyll (TCL); middle infrared with near infrared (MIRNIR) relationship, and near infrared with blue (NIRB), based in the blue, green, red, near infrared and middle infrared spectral bands with the goal of estimating the growth of Big River variety tomato plants, stressed by water and nitrogen deficiency, using remote perception. The evaluation was conducted in greenhouse conditions in function of their ability to estimate changes in growth indicators (WI): leaf area index and dry matter of aerial part, in eight sampling date. Both WI, were satisfactorily estimated by all VI considered, from the first to the fourth sampling date, 36 days after transplanting. Afterwards, the magnitude of reflectance data practically did not change nor did the VI formulated with these bands (TCL and NIRB). This reduced its predictive value in the following sampling. The MIRNIR Index was the best for estimating the WI, because it was formulated with bands from the infrared spectrum which reach saturation slower than the visible spectrum. It was also better than the normalized difference vegetation index NDVI, used as a reference.

Index words: spectral reflectance, fertigation, greenhouse.

INTRODUCCIÓN

Se entiende por índice de vegetación (IV) un parámetro calculado a partir de valores de reflectancia espectral a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones

¹ Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

[‡] Autor responsable (rsjg_25@hotmail.com)

² Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas. La mayoría de los índices de vegetación que se han generado para estimar el crecimiento de plantas sanas se formulan a partir de las bandas del rojo y el infrarrojo cercano (Jackson y Huete, 1991; Baret y Guyot, 1991; Schowengerdt, 1997; Paz *et al.*, 2005). Sin embargo, los índices basados en estas bandas frecuentemente muestran una falta de sensibilidad en estados de crecimiento avanzados conduciendo a efectos de saturación o estabilización, y dispersión (Thenkabail *et al.*, 2000). Por otro lado, cuando la planta se encuentra bajo condiciones que limitan su crecimiento, los índices de vegetación más comunes no son sensibles para diferenciar entre grados de estrés. Para estos casos Thenkabail *et al.* (2000) recomienda usar otros índices que utilizan bandas como el verde y el infrarrojo medio. Carter y Knapp (2001) y Schlemmer *et al.* (2005) recomiendan utilizar las bandas del espectro visible en los rangos de 525 a 680 nm y 695 a 725nm, que corresponden a la bandas del verde, el rojo y la frontera entre el rojo lejano e infrarrojo cercano respectivamente, para el estudio del crecimiento de plantas afectadas por estrés de agua y nitrógeno.

Por lo anterior, en el presente estudio, se usaron las cinco bandas del espectro de reflectancia obtenido con el radiómetro espectral MSR5, para generar tres índices de vegetación, mediante la combinación de dos a tres bandas, con al menos una banda diferente al rojo o infrarrojo cercano para estimar el crecimiento de plantas de tomate estresadas por deficiencia de agua y nitrógeno, esperando que al menos una de las combinaciones sea lo suficientemente sensible para distinguir entre plantas con diferente condición de estrés y así poder identificarlas en forma remota. Los nuevos índices se evaluaron en su capacidad de predicción, con indicadores de crecimiento de plantas de tomate: índice de área foliar y materia seca de la parte aérea, que crecieron bajo condiciones de invernadero, estresadas por deficiencia de agua y nitrógeno. El mejor índice se definió por su capacidad para estimar los cambios en los indicadores de crecimiento y por sus ventajas sobre el índice de vegetación de diferencia normalizada (IVDN).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó, en invernadero, en el Colegio de Postgraduados (Montecillo, estado de México). Se utilizaron plantas de tomate, variedad Río

Grande, de crecimiento determinado. El diseño de tratamientos fue un factorial (3×2). Los factores fueron lámina de riego (L) y dosis de nitrógeno (N), con niveles de 20 y 80% del consumo de la humedad aprovechable, y 50, 25 y 10% de nitratos, respecto a la solución universal de Steiner (Steiner, 1961), respectivamente. Los tratamientos resultantes fueron: T1 ($L_{20} N_{50}$); T2 ($L_{20} N_{25}$); T3 ($L_{20} N_{10}$); T4 ($L_{80} N_{50}$); T5 ($L_{80} N_{25}$) y T6 ($L_{80} N_{10}$). Se trabajó con un diseño experimental completamente aleatorizado con tres repeticiones. El tamaño de la parcela experimental fue de 2.3 m². El sustrato utilizado fue arena de tezontle rojo tamizada a 2 mm. Las soluciones se aplicaron mediante un sistema de fertirrigación con goteros integrados separados 30 cm con un gasto de 720 mL h⁻¹.

Los indicadores de crecimiento (IC) fueron: índice de área foliar (IAF) y materia seca del follaje (MSF), y se obtuvieron por muestreos destructivos tomando una planta por unidad experimental. El área foliar se midió con el integrador de área foliar LI-COR 3100, el peso seco de follaje con una balanza OHAUS con 0.1 g de aproximación. La reflectancia se cuantificó con el radiómetro espectral MSR5 de la marca CROPSCAN, INC que capta la reflectancia espectral en cinco bandas: azul (A), 450-520 nm, verde (V), 520-600 nm, rojo (R), 630-690 nm, infrarrojo cercano (IRC), 760-900 nm e infrarrojo medio (IRM), 1550-1750 nm. Se realizaron ocho muestreos: 13, 21, 28, 36, 43, 56, 77 y 98 días después del trasplante (DDT). Cada muestreo se hizo sobre una área de 1 m², de 12:00 a 13:00 horas, con cielo despejado, el mismo día de los muestreos destructivos. Los índices de vegetación (IV) se calcularon a partir de las 5 bandas captadas por el radiómetro espectral MSR5. Los índices propuestos fueron: clorofila total (CLT), $CLT = (V_{560} / R_{660} + A_{485})$; relación del infrarrojo medio con el infrarrojo cercano $IRMYC = (IRC_{830} - IRM_{1650}) / (IRC_{830} + IRM_{1650})$ y relación del infrarrojo cercano con azul $IRA = (IRC_{830} - A_{485}) / (IRC_{830} + A_{485})$. El índice utilizado como referencia fue el índice de vegetación de diferencia normalizada $IVDN = (IRC_{830} - R_{660}) / (IRC_{830} + R_{660})$. El estrés por deficiencia de agua se indujo de los 35 a 49 DDT. La información se analizó mediante procedimientos de regresión con mínimos cuadrados, análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiples, Tukey, a 5% de probabilidad, con los programas Minitab 14 (2004) y la hoja electrónica excel 2000.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto Sobre los Indicadores de Crecimiento (IC)

El efecto de los factores de estrés sobre el cultivo se manifestó en términos generales como una reducción del área foliar y materia seca del follaje. El análisis de varianza (Cuadro 1) indicó que hubo efecto de tratamientos en todos los muestreos. La discriminación de efectos significativos mediante la prueba de medias se presenta en el Cuadro 2.

El análisis de varianza indicó la presencia de efectos significativos de tratamientos en todos los muestreos, tanto para el IAF como para la MSF; sin embargo, en la prueba de medias se observa que fue sólo a partir del 5° muestreo, que los efectos de, prácticamente, todos los tratamientos fueron significativos en todos los muestreos para ambos IC, esto puede ser debido a dos razones: 1. A la mayor demanda nutrimental debida al crecimiento de la planta, a partir del 4° muestreo (Cuadro 2), y 2. A los efectos del periodo de inducción de estrés, el cual inició un día antes del 4° muestreo y terminó seis días después del 5° muestreo. También destaca el hecho de que los tratamientos T3 y T6 indujeron efectos significativos sobre los IC en todos los muestreos, este comportamiento puede deberse a que las plantas de estos tratamientos se mantuvieron con cero aplicación de nitrógeno hasta el segundo

Cuadro 1. Parámetros del análisis de varianza (ANVA): F calculada (Fc) y cuadrado medio del error (CME), para determinar efectos significativos de tratamientos sobre el índice de área foliar (IAF) y materia seca del follaje (MSF).

DDT	ANVA del índice de área foliar		ANVA de la materia seca del follaje	
	Fc	CME	Fc	CME
13	31.87 **	0.000344	19.31 **	0.911
21	58.08 **	0.00180	109.56**	4.44
28	54.41 **	0.00773	85.04 **	27.0
36	121.00**	0.00949	54.04 **	243
43	58.90 **	0.0397	139.44**	190
56	44.41 **	0.114	161.10**	450
77	131.42**	0.0482	44.99 **	1224
98	43.05 **	0.158	197.54**	1224
F de tablas = 5.06;		F de tablas = 3.11		
Prob. = 1%		Prob. = 5%		

** Efectos significativos al 1 y 5% de probabilidad; DDT = días después del transplante.

muestreo, y luego con el 10 % de nitrógeno respecto a la Solución Universal de Steiner.

En las curvas de la dinámica de IC se observó una marcada reducción del crecimiento en ambos IC por efecto de tratamientos, siendo mayor el efecto para los tratamientos, T5 y T6, afectados por ambos factores de estrés, y en T3 por tener el menor nivel de nitrógeno. También se observó que la reducción se acentuó en la medida que se disminuyó el contenido de nitrógeno en los tratamientos, independientemente del nivel de estrés por deficiencia de agua; entonces, estos resultados se explican por el efecto de tratamientos.

En general, los resultados encontrados en el presente estudio, concuerdan con los reportados en la literatura para plantas de tomate estresadas por deficiencia de nitrógeno y por deficiencia de agua. La deficiencia de nitrógeno se presenta como una reducción en tamaño y número de hojas (Scholberg *et al.*, 2000; Suniaga *et al.*, 1992; Martínez *et al.*, 2005); reducción en el área foliar (Martínez *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005) y en la materia seca (Suniaga *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2005). Estas alteraciones en la morfología de la planta se deben a alteraciones fisiológicas como: reducción del contenido de nitrógeno en hojas y tallos (Scholberg *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2005); reducción del contenido de clorofila (Zhao *et al.*, 2005); reducción de la fotosíntesis neta (Guidi, *et al.*, 1998; Martínez *et al.*, 2005); y reducción de la conductancia de CO₂ en el mesófilo (Guidi, *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 2005). Los efectos por deficiencia de agua dependen del grado, la frecuencia y época en que se aplica, y se presentan como una reducción en el crecimiento (Abou Hadid *et al.*, 1986; Bai, 1991); desarrollo (Abou Hadid *et al.*, 1986); peso seco de follaje (Bai, 1991; Rahman *et al.*, 1998b; García *et al.*, 2004); número de hojas (García *et al.*, 2004), y también están asociados con alteraciones en la fisiología de la planta, tales como: reducción en la fotosíntesis neta (Bai, 1991; Rahman *et al.*, 1998a; Sirinivasa-Rao *et al.*, 2000; Zgallai *et al.*, 2001; Flexas y Medrano, 2002; Chen *et al.*, 2004; Zgallai *et al.*, 2005), conductancia estomatal (Sirinivasa-Rao *et al.*, 2000; García *et al.*, 2004; Zgallai *et al.*, 2005), tasa de transpiración (Sirinivasa-Rao *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2004; Zgallai *et al.*, 2005), contenido de nitrógeno (Reynaldo *et al.*, 2002), absorción de nitrógeno por las raíces (Nahar y Gretzmacher, 2002), contenido de proteína soluble (Reynaldo *et al.*, 2002; Zgallai *et al.*, 2005), contenido de clorofila (Zgallai *et al.*, 2005), entre otros.

Cuadro 2. Resultados de la prueba de medias de indicadores de crecimiento (IC), índice de área foliar (IAF) y materia seca del follaje (MSF), por tratamiento (T1 a T6) y por muestreo, tomando como referencia el tratamiento 20% de humedad aprovechable y 50% de nitrógeno de la solución nutritiva Steiner, testigo.

IC	Humedad aprovechable	Nitrógeno de solución Steiner	Días después del trasplante								
			13	21	28	36	43	56	72	98	
	----- % -----										
IAF	20	50	0.15	0.48	0.97	1.69	2.47	3.62	4.18	4.43	
IAF	20	25	0.15 NS	0.34 *	0.77 NS	1.48 NS	2.10 NS	2.40 *	3.08 *	3.19 *	
IAF	20	10	0.02 *	0.04 *	0.18 *	0.35 *	0.54 *	0.61 *	0.91 *	0.98 *	
IAF	80	50	0.15 NS	0.40 NS	0.89 NS	1.44 NS	1.79 *	2.73 *	2.89 *	2.93 *	
IAF	80	25	0.13 NS	0.36 *	0.85 NS	1.23 *	1.30 *	1.44 *	1.66 *	1.67 *	
IAF	80	10	0.03 *	0.05 *	0.13 *	0.25 *	0.24 *	0.26 *	0.34 *	0.43 *	
MSF	20	50	6.9	34.5	69.3	177	260.4	444.1	654	855	
MSF	20	25	6.8 NS	25.5 *	54.3 *	137.7 NS	216.3 *	352.0 *	469.5 *	668.7 *	
MSF	20	10	1.8 *	5.1 *	10.5 *	26.7 *	48.0 *	87.0 *	144.9 *	270.9 *	
MSF	80	50	7.2 NS	28.4 *	65.4 NS	153.6 NS	208.5 *	301.8 *	493.2 *	794.7 NS	
MSF	80	25	6.0 NS	27.3 *	58.8 NS	115.8 *	159.6 *	231.6 *	310.2 *	482.1 *	
MSF	80	10	2.4 *	4.8 *	8.1 *	21.0 *	33.0 *	41.4 *	82.2 *	157.2 *	

* Significativo a 5% de probabilidad; NS = no significativo.

En base a lo anterior se puede decir que los efectos de los tratamientos afectados por un periodo de deficiencia de agua durante la etapa de floración y llenado de fruto, en la presente investigación, se manifiestan en forma similar a la deficiencia de nitrógeno como una reducción en el crecimiento de plantas de tomate, que está íntimamente asociada a una reducción en su capacidad fotosintética.

Efecto Sobre los Índices de Vegetación (IV)

Una vez calculados los IV fueron sometidos a diferentes pruebas, la primera fue para ver si el efecto de tratamientos se manifestaba en ellos en forma similar a los IC. Para ello se realizó un análisis de varianza que resultó significativo en todos los muestreos (Cuadro 3), y una prueba de medias cuyos resultados se muestran en el Cuadro 4.

En el Cuadro 3. se observó la presencia de efectos significativos de tratamientos; sin embargo, es evidente que los IV tienen una sensibilidad menor que los IC para manifestar dichos efectos (Cuadro 4), esto se debe a que los IV solo representan una medida indirecta del crecimiento de la planta. Los efectos significativos de los tratamientos T3 y T6 en todos los muestreos, tanto para los IC como para los IV se debió a que las condiciones de estrés impuestas por ellos,

se manifestaron de manera drástica en la estructura de la planta, afectando, en la misma forma, sus propiedades ópticas, y también porque el sustrato siempre estuvo influyendo en dichos tratamientos (Sánchez *et al.*, 2000), debido a que durante todo el ciclo de desarrollo estuvieron por debajo del 50% de cobertura vegetal. La manifestación de efectos significativos en el 5° muestreo se debió a la inducción de estrés por deficiencia de agua que inició un día antes del 4° muestreo y terminó seis días después del 5° muestreo, ya que este período coincidió con la etapa de demanda alta de factores de la nutrición, por encontrarse en la etapa en que ocurren, simultáneamente, la floración, amarre de frutos y la mayor tasa de crecimiento de la planta.

En la discusión sobre IC se obtuvo que tanto la deficiencia de nitrógeno como de agua reducen la capacidad fotosintética de la planta, ya sea por una reducción en el área foliar o por una reducción de nitrógeno y clorofila en las hojas (Schepers *et al.*, 1996; Carter y Knapp, 2001; Schlemmer *et al.*, 2005); estas alteraciones inciden directamente sobre los pigmentos, estructura del mesófilo y contenido de agua en la hoja, que son los factores dominantes que controlan las propiedades ópticas de las plantas (Al-Abbas *et al.*, 1974). La disminución de clorofila se representa, espectralmente hablando, como un incremento de reflectancia en las bandas del azul y el rojo, esto debido

Cuadro 3. Parámetros del análisis de varianza (ANVA): F calculada (Fc) y cuadrado medio del error (CME), para determinar efectos significativos de tratamientos sobre los índices de vegetación, clorofila total (CLT); diferencia normalizada (IVDN); infrarrojo medio con infrarrojo cercano (IRMYC), e infrarrojo cercano con azul (IRA) a diferentes días después del transplante (DDT).

DDT	Índices de vegetación								
	CLT		IVDN		IRMYC		IRA		
	Fc	CME	Fc	CME	Fc	CME	Fc	CME	
13	30.29 **	0.000111	278.16 **	0.000074	20.82 **	0.000284	12.69 **	0.000773	
21	61.37 **	0.000428	223.27 **	0.000412	96.44 **	0.000326	54.63 **	0.00092	
28	251.34 **	0.00025	354.73 **	0.000173	101.89 **	0.000271	414.11 **	0.0000716	
36	34.84 **	0.00141	29.40 **	0.00145	15.46 **	0.00209	28.78 **	0.000783	
43	45.91 **	0.00101	168.77 **	0.000179	22.64 **	0.000841	47.59 **	0.000273	
56	6.37 **	0.00902	79.36 **	0.000227	5.73 **	0.00184	19.95 **	0.000336	
72	88.92 **	0.000367	88.65 **	0.000147	16.29 **	0.000983	41.48 **	0.000135	
98	21.13 **	0.00137	52.62 **	0.000231	13.98 **	0.00101	33.56 **	0.000151	
F de tablas = 5.06; Prob. = 1%		F de tablas = 3.11; Prob. = 5%							

** Efectos significativos al 1 y 5% de probabilidad.

a que se reduce la absorción de energía al disminuir la de clorofila a y clorofila b; y como una disminución en la banda verde, debido a que se reduce el volumen de material reflejante verde (Carter, 1993; Gitelson y Merzlyak, 1996). Por otro lado, la disminución del área foliar, implica, en términos globales, una reducción del volumen de espacios intercelulares en el mesófilo de las hojas, así como del volumen de agua líquida presente por unidad de área, estos cambios implican una reducción en la reflectancia espectral en la banda del infrarrojo cercano, debido a que al reducirse los espacios en el mesófilo se incrementa la dispersión en esta banda, reduciendo con ello la reflectancia; también implican un incremento de reflectancia en la banda del infrarrojo medio, debido a que al reducirse el volumen de agua líquida se reduce la absorción de la radiación en esta banda, y por lo tanto se incrementa la radiación reflejada. Estas alteraciones en las propiedades ópticas de plantas estresadas se traduce necesariamente en diferencias en los IV para cada tratamiento y para cada muestreo, esto se observa en el Cuadro 5, donde todos los IV tienen R^2 superiores a 0.9, lo que indica que representan satisfactoriamente a los IC en los diferentes niveles de estrés aplicados. Sin embargo, cuando la cobertura vegetal es superior al 50% (lo cual ocurrió alrededor del 4º muestreo para los tratamientos T1, T2, T4 y T5) se saturan las bandas del espectro visible (Sánchez *et al.*, 2000), y se observan los cambios antes indicados, y se reduce con ello el valor de predicción de los IV que las contienen, esto se observa también en el Cuadro 5

en los valores de R^2 de la correlación entre muestreos para un mismo tratamiento.

Patrones de Comportamiento de IC e IV

La segunda prueba fue para ver la similitud de comportamiento entre IC e IV, esto se hizo mediante el análisis de la dinámica de los mismos; es decir, por sus cambios a través del tiempo (Figura 1 incisos a y b para IC, e incisos b, c, d y e para IV).

Relación entre IC e IV

La tercera y última prueba fue establecer la medida en que ambas variables estaban relacionadas. La relación se estableció mediante ecuaciones de regresión obtenidas por un procedimiento de mínimos cuadrados. El modelo que mejor ajustó, para todos los casos, fue el exponencial del tipo $y = ae^{bx}$, donde el IV fungió como la variable independiente y el IC como la variable dependiente. Las ecuaciones se obtuvieron en dos sentidos, el primero estableciendo la relación IV contra IC entre tratamientos para cada muestreo; y el segundo, estableciendo la relación IV vs. IC entre muestreos para cada tratamiento. La bondad del ajuste entre dichos parámetros se determinó por el valor del coeficiente de determinación, varianza y F calculada de la regresión. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.

Existe una clara correspondencia entre los efectos producidos por los tratamientos, tanto en los IC como

Cuadro 4. Resultados de la prueba de medias de índices de vegetación (IV): clorofila total (CLT); diferencia normalizada (IVDN); infrarrojo medio con infrarrojo cercano (IRMYC), e infrarrojo cercano con azul (IRA), por tratamiento (T1 a T6) y por muestreo (M1 a M8), tomando como referencia el tratamiento testigo, T1.

Índices de vegetación	Días después del trasplante							
	13	21	28	36	43	56	77	98
CLT T1	0.49	0.63	0.83	0.86	0.88	0.9	0.87	0.87
CLT T2	0.49 NS	0.64 NS	0.86 NS	0.88 NS	0.90 *	0.88 NS	0.83 NS	0.82 NS
CLT T3	0.42 *	0.44 *	0.57 *	0.65*	0.71 *	0.65 NS	0.68 *	0.67 *
CLT T4	0.48 NS	0.61 NS	0.79 NS	0.79 NS	0.76 *	0.80 NS	0.80 *	0.80 NS
CLT T5	0.48 NS	0.63 NS	0.84 NS	0.78 NS	0.78 *	0.75 NS	0.75 *	0.76 *
CLT T6	0.42 *	0.45 *	0.53 *	0.55 *	0.56 *	0.54 *	0.59 *	0.61 *
IVDN T1	0.39	0.67	0.81	0.86	0.87	0.87	0.89	0.89
IVDN T2	0.40 NS	0.64 NS	0.81 NS	0.85 NS	0.85 NS	0.85 NS	0.85 *	0.85 NS
IVDN T3	0.24 *	0.31 *	0.56 *	0.66 *	0.76 *	0.76 *	0.78 *	0.78 *
IVDN T4	0.39 NS	0.66 NS	0.81 NS	0.85 N	0.84 NS	0.84 NS	0.87 NS	0.88 NS
IVDN T5	0.41 NS	0.64 NS	0.81 NS	0.82 NS	0.80 *	0.80 *	0.85 *	0.83 *
IVDN T6	0.24 *	0.31 *	0.51 *	0.58 *	0.60 *	0.66 *	0.71 *	0.73 *
IRMYC T1	0.13	0.33	0.47	0.56	0.6	0.56	0.67	0.7
IRMYC T2	0.14 NS	0.29 NS	0.46 NS	0.54 NS	0.56 NS	0.55 NS	0.59 NS	0.69 NS
IRMYC T3	0.06 *	0.12 *	0.28 *	0.35 *	0.47 *	0.49 NS	0.56 *	0.62 *
IRMYC T4	0.14 NS	0.32 NS	0.46 NS	0.53 NS	0.59 NS	0.57 NS	0.67 NS	0.72 NS
IRMYC T5	0.13 NS	0.31 NS	0.42 *	0.51 NS	0.50 *	0.53 NS	0.67 NS	0.66 NS
IRMYC T6	0.04 *	0.11 *	0.26 *	0.32 *	0.39 *	0.41 *	0.50 *	0.54 *
IRA T1	0.53	0.73	0.83	0.88	0.87	0.88	0.91	0.91
IRA T2	0.54 NS	0.69 NS	0.83 NS	0.86 NS	0.86 NS	0.87 NS	0.87 *	0.89 NS
IRA T3	0.43 *	0.46 *	0.64 *	0.72 *	0.80 *	0.82 *	0.83 *	0.84 *
IRA T4	0.56 NS	0.73 NS	0.83 NS	0.87 NS	0.86 NS	0.87 NS	0.90 NS	0.90 NS
IRA T5	0.57 NS	0.71 NS	0.83 NS	0.84 NS	0.83 *	0.85 NS	0.88 NS	0.87 *
IRA T6	0.45 *	0.48 *	0.64 *	0.67 *	0.70 *	0.76 *	0.79 *	0.80 *

* Significativo a 5% de probabilidad; NS = no significativo; T1 = 20% de humedad aprovechable (HA) y 50% de nitrógeno (N) de la solución Steiner (SS); T2 = 20% HA y 25% N SS; T3 = 20% HA y 10% N SS; T4 = 80% HA y 50% N SS; T5 = 80% HA y 25% N SS; T6 = 80% HA y 10% N SS.

en los IV (Figura 1) debido a que las alteraciones fisiológicas y estructurales en la planta se manifiestan a través de las propiedades ópticas (reflectancia, transmitancia y absorbancia) de las mismas. En la medida en que esa correspondencia fue más estrecha la correlación entre los parámetros tuvo mejor ajuste; por esta razón el índice IVDN resultó ser el mejor para representar el comportamiento entre tratamientos y el índice IRMYC para el comportamiento entre muestreos (Cuadro 5). Esta relación se entiende porque los IC y los IV cambian a través del tiempo y, en particular, porque el índice IRMYC se formuló con las bandas del IRC y el infrarrojo medio (IRM), cuya saturación es más lenta que las bandas del espectro visible (Figura 3b), y por lo tanto puede captar durante más tiempo las diferencias biofísicas de las plantas que se presentan durante su ciclo de desarrollo. La tendencia que se

observa en la gráfica de la Figura 2a representa adecuadamente este comentario, ya que a partir del 4º muestreo, cambios en el orden de las centésimas en el IV representan cambios en el orden de las unidades en el IC, mientras que en la Figura 2b los cambios en el IV corresponden con cambios proporcionales en los IC obteniendo de esta manera valores más altos de R^2 y valores más pequeños de S^2 . En este sentido, el índice CLT obtuvo el menor ajuste debido a que se formuló solo con bandas del espectro visible, que tienen el problema de saturación.

Hasta aquí, se ha encontrado que todos los IV estudiados son convenientes para estimar el efecto de tratamientos hasta el 4º muestreo, 36 días después del trasplante, pero no todos son convenientes para ello en los muestreos siguientes porque se saturan las bandas del espectro visible, en este caso se encuentran

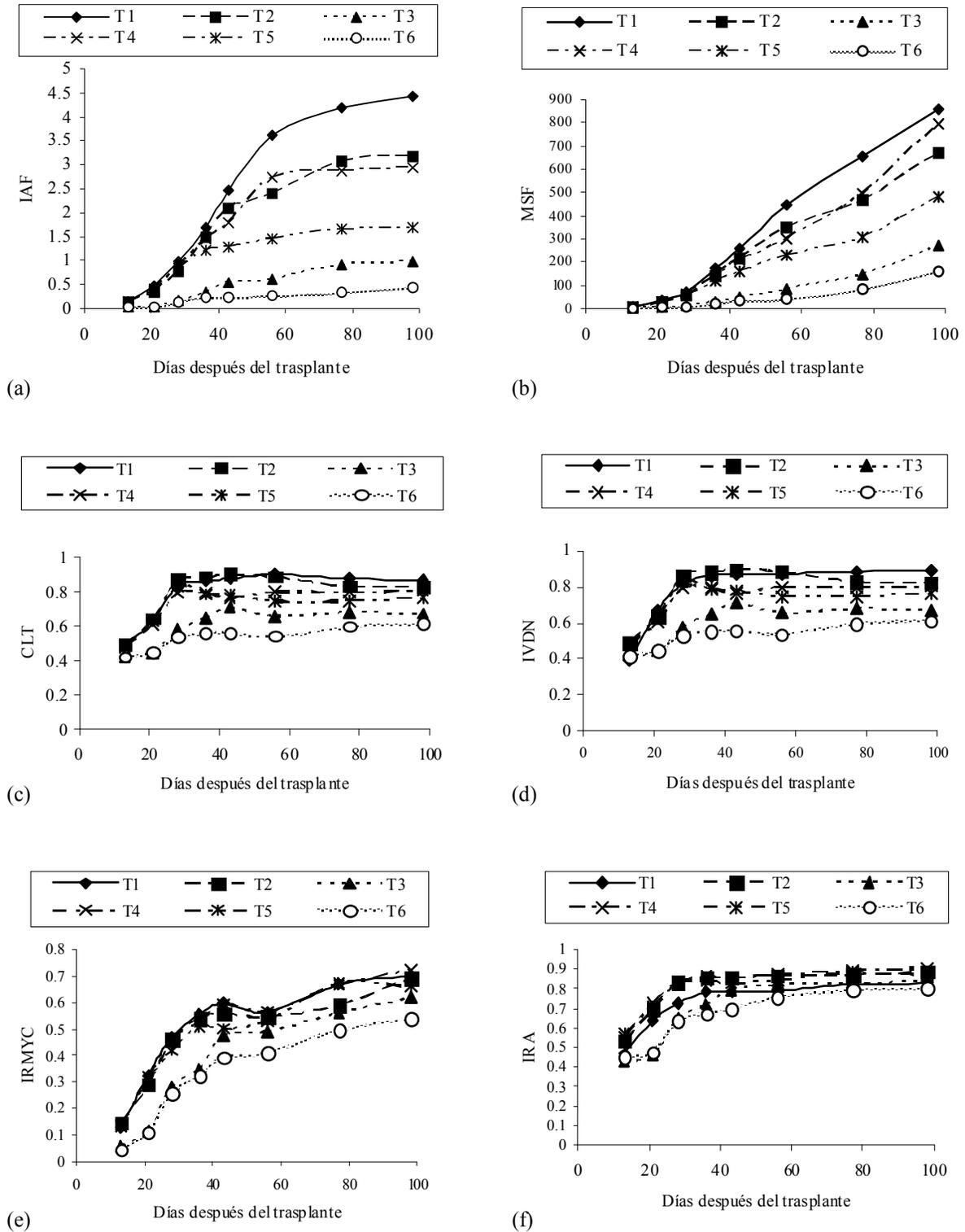


Figura 1. Dinámica de indicadores del crecimiento: (a) índice de área foliar (IAF, m² m⁻²); (b) materia seca del follaje (MSF, g m⁻²) e índices de vegetación por tratamiento (T1 a T6): (c) clorofila total (CLT); (d) índice de vegetación de diferencia normalizada (IVDN); (e) infrarrojo medio con infrarrojo cercano (IRMYC) y (f) infrarrojo cercano con azul (IRA). Todos los índices de vegetación son adimensionales. T1 = 20% de humedad aprovechable (HA) y 50% de nitrógeno (N) de la solución Steiner (SS); T2 = 20% HA y 25% N SS; T3 = 20% HA y 10% N SS; T4 = 80% HA y 50% N SS; T5 = 80% HA y 25% N SS; T6 = 80% HA y 10% N SS.

Cuadro 5. Valores promedio del coeficiente de determinación (R^2), varianza (S^2) y F calculada (F) de la regresión entre índices de vegetación: clorofila total (CLT); diferencia normalizada (IVDN); infrarrojo medio con infrarrojo cercano (IRMYC), infrarrojo cercano con azul (IRA) e indicadores de crecimiento (IC): índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$); materia seca del follaje (MSF, $g m^{-2}$).

Relación	Regresión entre tratamientos			Regresión entre muestreos		
	R^2	S^2	F	R^2	S^2	F
CLT contra IAF	0.9538	0.0503	115.60	0.8641	0.1879	58.18
CLT contra MSF	0.9327	0.0629	81.92	0.7621	0.6757	23.81
MEDIA CLT contra IC	0.9432	0.0566	98.76	0.8131	0.4318	41.00
IVDN contra IAF	0.9730	0.0287	376.55	0.9260	0.1078	180.02
IVDN contra MSF	0.9602	0.0346	398.49	0.8556	0.4167	39.46
MEDIA IVDN contra IC	0.9666	0.0316	387.52	0.8908	0.2623	109.74
IRMYC contra IAF	0.9271	0.0788	301.33	0.9541	0.0630	133.88
IRMYC contra MSF	0.9249	0.0631	311.11	0.9690	0.0891	219.05
MEDIA IRMYC contra IC	0.9260	0.0710	306.22	0.9616	0.0761	176.47
IRA contra IAF	0.9601	0.0419	381.96	0.9435	0.0819	191.87
IRA contra MSF	0.9520	0.0393	429.04	0.8912	0.3142	52.05
MEDIA IRA contra IC	0.9561	0.0406	405.50	0.9174	0.1980	121.96

los índices IRA, IVDN y CLT. Por otro lado el índice IRMYC, aunque su capacidad para predecir efectos entre tratamientos de un mismo muestreo no fue la mayor, si es aceptable (Cuadro 5) y por lo tanto, es el mas conveniente para estimar los cambios de crecimiento de plantas estresadas a través de su ciclo de desarrollo.

Comportamiento Gráfico de las Relaciones IV contra IC y Dinámica de la Reflectancia Espectral

Estos dos aspectos fueron importantes para definir el IV más conveniente. La relación IV contra IC se ilustra en la Figura 2. En la Figura 2a se muestra que

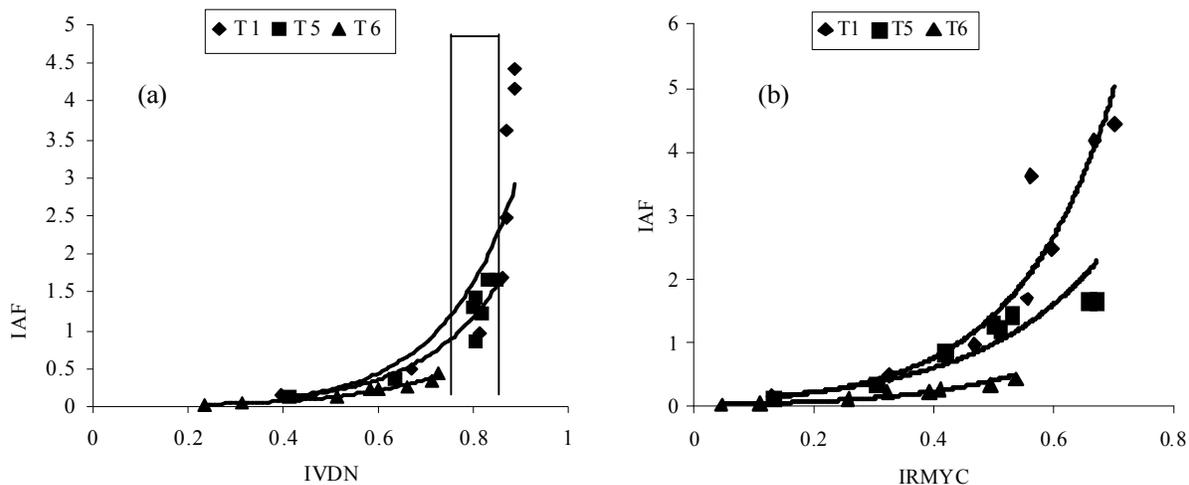


Figura 2. Comparativo de datos observados y estimados: (a) índice de vegetación de diferencia normalizada (IVDN) y (b) índice infrarrojo medio con infrarrojo cercano (IRMYC), ambos relacionados con el índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$). Las líneas continuas corresponden a los valores estimados. T1 = 20% de humedad aprovechable (HA) y 50% de nitrógeno (N) de la solución Steiner (SS); T2 = 20% HA y 25% N SS; T3 = 20% HA y 10% N SS; T4 = 80% HA y 50% N SS; T5 = 80% HA y 25% N SS; T6 = 80% HA y 10% N SS.

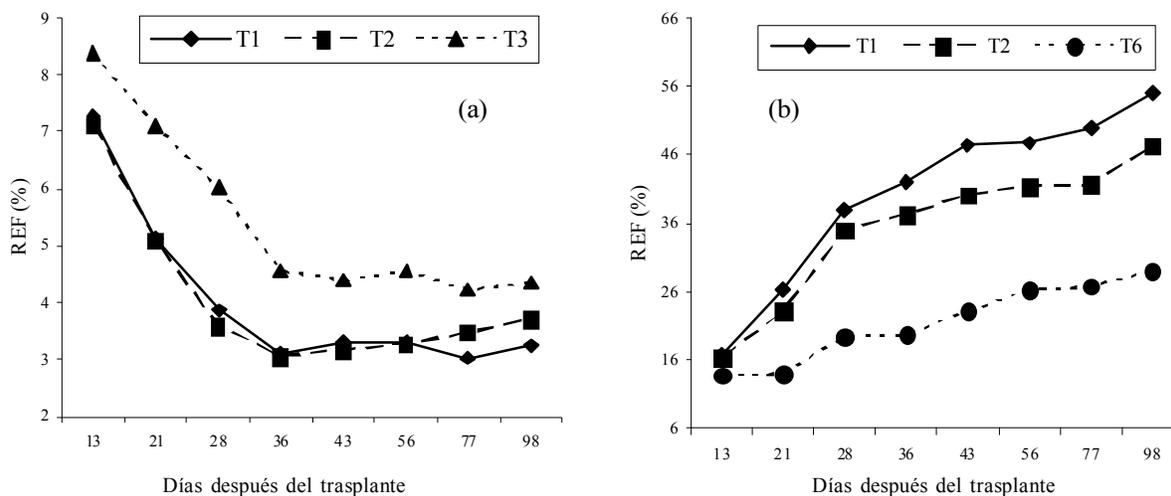


Figura 3. Dinámica de la reflectancia (REF) en las bandas del rojo (a) y del infrarrojo cercano (b). T1 = 20% de humedad aprovechable (HA) y 50% de nitrógeno (N) de la solución Steiner (SS); T2 = 20% HA y 25% N SS; T3 = 20% HA y 10% N SS; T4 = 80% HA y 50% N SS; T5 = 80% HA y 25% N SS; T6 = 80% HA y 10% N SS.

las observaciones del 4^o al 8^o muestreo se concentraron en un intervalo de valores estrecho; esto ocurrió para los índices CLT, IVDN e IRA, mientras que en la Figura 2b el índice IRMYC mostró una mejor distribución. En la Figura 3a se observa que las bandas del espectro visible se saturaron alrededor del 4^o muestreo, mientras que las del infrarrojo cercano continuaron creciendo (Figura 3b).

CONCLUSIONES

- El índice IRMYC resultó ser el índice de vegetación más conveniente para estimar el crecimiento de doseles de plantas de tomate, variedad Río Grande, cultivadas en invernadero, bajo estrés por deficiencia de agua y nitrógeno, durante su ciclo de desarrollo.
- Los índices de vegetación generados con bandas dentro del espectro visible, así como los generados por la combinación de bandas del espectro visible y bandas del infrarrojo son convenientes para estimar el crecimiento de plantas estresadas y no estresadas de tomate, variedad Río Grande, hasta que se saturan las bandas del espectro visible por efecto de la cobertura vegetal.

LITERATURA CITADA

Abou Hadid, A. F., A. S. El-Beltagy, A. R. Smith, and M. A. Hall. 1986. Effect of water stress on tomato at different stages of development. *Acta Hort.* 190: 405-414.

- Al-Abbas, A. H., R. Barr, J. D. Hall, F. L. Crane, and M. F. Baumgardner. 1974. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. *Agron. J.* 66: 16-20.
- Bai Ch., L. G. 1991. Effects of water stress on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedling. *Acta Hort.* 18: 340-344.
- Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation index for IAF and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173.
- Carter, G. A. 1993. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *Am. J. Bot.* 80: 239-243.
- Carter, G. A. and A. K. Knapp. 2001. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.* 88: 677-684.
- Chen, Jin-ping, Liu Zu-gui, Duan Ai-wang, Meng Zhao-jiang, and Zhang Ji-yang. 2004. Effects of soil moisture on physiological characteristics and the dynamic state of factors causing photosynthesis decline in potted tomato leaves in green house. *Acta Bot. Boreal-Occident. Sin.* 24: 1589-1593.
- Flexas, J. and H. Medrano. 2002. Energy dissipation in C3 plants under drought. *Functional Plant Biology* 29: 1209-1215.
- García, M. D., K. C. Petzall, and M. Castrillo. 2004. Responses of the varieties of tomato Río Grande and Pera Quibor to deficits of water. *Agron. Trop.* 54: 411-431.
- Gitelson, A. A. and M. N. Merzlyak. 1996. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *J. Plant Physiol.* 148: 494-500.
- Guidi, L., G. Lorefice, A. Pardossi, F. Malorgio, F. Tognoni, and G. F. Saldatini. 1998. Growth and photosynthesis of *Lycopersicon esculentum* (L.) plants as affected by nitrogen deficiency. *Biol. Plant.* 40: 235-244.
- Jackson, R. D. and A. R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indexes. *Preventive Veterinary Medicine* 11: 185-200.
- Martinez, V., F. M. Del Amor, and L. F. M. Marcelis. 2005. Growth and physiological response of tomato plants to different periods of nitrogen starvation and recovery. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 80: 147-153.

- Nahar, K. and R. Gretzmacher. 2002. Effect of water stress on nutrient uptake, yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under subtropical conditions. *J. Agric. Res.* 53: 45-51.
- Paz Pellat, F., E. Palacios V., E. Mejía S., M. Martínez M. y L. A. Palacios S. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Rahman, S. M. L., E. Nawata, and T. Sakuratani. 1998a. Effect of water stress on physiological and related morphological characters among tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. *Thai J. Agric. Sci.* 31: 60-78.
- Rahman, S. M. L., E. Nawata, and T. Sakuratani. 1998b. Effect of water stress on yield and morphological characters among tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. *Thai J. Agric. Sci.* 31: 130-141.
- Reynaldo, I. M., I. Pérez, E. Jerez y J. M. Dell'Amico. 2002. Efectos del estrés hídrico en la asimilación del nitrógeno en plantas de tomate cv. INCA 9-1. *Cultivos Tropicales* 23: 47-50.
- Sánchez, R. E., M. A. Torres C., A. F. Palacios C., M. Aguilar A., I. Pino S. y L. Granado R. 2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como indicadores para la asignación de modelos de combustible para la estimación de incendios en Andalucía. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible. Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Asociación de Geógrafos Españoles. Num. 9.* Madrid. Servicio de Publicaciones del Departamento de Geografía Física. Universidad de Alcalá de Henares. 9: 22-32.
- Schepers, J. S., T. M. Blackmer, W. Wilhelm, and M. Resende. 1996. Transmittance and reflectance of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *J. Plant Physiol.* 148: 523-529.
- Schlemmer, M. R., D. D. Francis, J. F. Shanahan, and J. S. Schepers. 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and water content. *Agron. J.* 97: 106-112.
- Scholberg, J., B. L. McNeal, K. J. Boote, J. W. Jones, S. J. Locascio, and S. M. Olson. 2000. Nitrogen stress effects and nitrogen accumulation by field-grown tomato. *Agron. J.* 92: 159-167.
- Schowengerdt, R. A. 1997. *Remote sensing. Models and methods for image processing.* Academic Press Limited. San Diego, CA, USA.
- Sirinivasa Rao, N. K., R. M. Bhatt, and A. T. Sadashiva. 2000. Tolerance to water stress in tomato cultivars. *Photosynthetica* 38: 465-467.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solution of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Suniaga, Q. J., M. Bonafous, and Y. Dumas. 1992. Growth and development of young tomato plants under nitrogen deficiency. *Acta Hort.* 301: 159-164.
- Thenkabail P. S., R. B. Smith, and E. De Pauw. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural crop characteristics. *Remote Sens. Environ.* 71: 158-182.
- Zgallai, H., K. Steppe, H. Pien, and R. Lemeur. 2001. Effect of water stress induced by adding polyethylene glycol (PEG 6000) in the nutrient solution on the photosynthesis rate of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* cv. Nikita). *Meded. Fac. Landbouwk. Toegep. Biol. Wet.* 66: 125-128.
- Zgallai, H., K. Steppe, and R. Lemeur. 2005. Photosynthetic, physiological and biochemical responses of tomato plants to polyethylene glycol- induced water deficit. *J. Integr. Plant Biol.* 47: 1470-1478.
- Zhao, D.; K. R. Reddy, V. G. Kakany, and V. R. Reddy. 2005. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *Eur. J. Agron.* 22: 391-403.