

ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO DE TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.)

R. López-López¹; R. Arteaga-Ramírez²;
M. A. Vázquez-Peña³; I. L. López-Cruz²;
I. Sánchez-Cohen¹; A. Ruiz-García²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
Km 1 Carretera Huimanguillo-Cárdenas. Huimanguillo, Tabasco, MÉXICO.
Correo-e: lopez.rutilo@inifap.gob.mx (⁴Autor responsable).

²Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua.
Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco.
Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.
Correo-e: arteagar@correo.chapingo.mx

³Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo.
Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.
Correo-e: mavazquez.coahuila@gmail.mx

RESUMEN

El uso de la termometría infrarroja para medir el índice de estrés hídrico de cultivos (*IEHC*) es una herramienta confiable en la programación de riegos, combinado con sistemas eficientes de riego permiten maximizar la productividad de cultivos. Los objetivos del trabajo fueron determinar el *IEHC* en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) producido con riego por goteo, su relación con láminas de riego y acolchado plástico en la programación del riego y predicción del rendimiento de frutos. El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones. Se estudiaron los efectos de cinco láminas de riego (reposición del 40, 60, 80, 100 y 120 % de la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith (ET_o)). El *IEHC* fue calculado a partir de mediciones de temperatura del cultivo y del aire, y de la humedad relativa con una pistola de rayos infrarrojos. Después el déficit de presión de vapor (*DPV*) se estimó. La ecuación que define el límite inferior del *IEHC* expresa la relación entre el *DPV* y la diferencia de temperatura del cultivo y del aire ($T_c - T_a$). Cuando el cultivo transpira, esta relación es: $T_c - T_a = 1.21 - 131 DPV$ ($r^2 = 0.68$, $P < 0.01$, $n = 42$) y el límite superior fue de 2.8 °C, cuando el cultivo no transpira. El rendimiento de frutos se correlacionó directamente con valores promedios de *IEHC* y se obtuvo la ecuación lineal: $Y = 52.53 - 69.7IEHC$ ($r^2 = 0.65$, $P < 0.01$ y $n = 30$). Los modelos que predicen el *IEHC* a partir de la lámina de riego y efecto de acolchado plástico se ajustan con r^2 de 0.87 a 0.96, $P < 0.01$ y $n = 30$. El *IEHC* aumenta linealmente cuando disminuye el potencial del agua.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: riego por goteo, programación del riego, predicción de rendimiento, acolchado plástico, potencial mátrico, evapotranspiración de referencia.

CROP WATER STRESS INDEX FOR HUSK TOMATOES (*Physalis ixocarpa* BROT.)

ABSTRACT

The infrared thermometer used to measure crop water stress index (*CWSI*) is a reliable tool for irrigation scheduling, which, combined with efficient irrigation systems can maximize crop productivity. A study was conducted to determine the crop water stress index in husk tomato, or tomatillo, (*Physalis ixocarpa* Brot.) under a drip irrigation system, its relationship with irrigation depth and plastic mulch in scheduling irrigation and predicting fruit yield. The experiment design was completely randomized with three replicates. Treatments consisted of five irrigation depths (replacement of 40, 60, 80, 100 and 120 % of the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith method). *CWSI* was estimated using infrared radiation gun measurements of canopy temperature, air temperature, and relative humidity, and water vapor pressure deficit was calculated. The equation which defines the lower limit expresses the relationship between vapor pressure deficit (*VPD*) and temperature difference (crop and air ($T_c - T_a$)). When the crop transpires, the relationship is: $T_c - T_a = 1.21 - 131 DPV$ ($r^2 = 0.68$, $P < 0.01$, $n = 42$), and the upper limit (stressed) was 2.8 °C, when

transpiration stops. Fruit yield showed a positive linear correlation with average CWSI values: $Y = 52.53 - 69.7CWSI$, ($r^2 = 0.65$, $P < 0.01$ and $n=30$). Prediction models of CWSI and means of the effect of irrigation water and plastic mulch were fit with $r^2 = 0.87$ to 0.96 , $P < 0.01$ and $n=30$. The CWSI increases linearly when the soil water potential decreases.

ADDITIONAL KEY WORDS: drip irrigation, irrigation scheduling, yield prediction, plastic mulch, drip irrigation, matric potential, reference evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

La programación del riego tiene como objetivo establecer las láminas y fechas apropiadas a lo largo del ciclo fenológico de un cultivo. El riego debe considerar diversos factores, como los requerimientos hídricos y las características de crecimiento propias de la especie y variedad, la demanda evaporante de la atmósfera, y las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo que determinan su capacidad de retención de agua ya que, junto con la profundidad del sistema radical efectivo, determinan la cantidad de agua posible de ser utilizada en el proceso evapotranspirativo del cultivo.

Diversos enfoques y métodos para la programación del riego en cultivos se han usado en diferentes países: medición directa e indirecta de la humedad del suelo, mediciones del estado energético del agua en el suelo, estimaciones de la demanda atmosférica y, en condiciones experimentales, determinaciones del potencial hídrico de las plantas (Buchner *et al.*, 1994) o termometría infrarroja (Giuliani *et al.*, 2001).

Idso *et al.* (1981) desarrollaron el método empírico del índice de estrés hídrico para la cuantificación de la tensión de humedad en los cultivos en regiones áridas, el cual depende de la determinación de las líneas base sin y con estrés hídrico. Las líneas base son específicas del cultivo y están influenciadas por el clima (Bucks *et al.*, 1985). Jackson *et al.* (1981) modificaron el IEHC incluyendo: el déficit de presión del vapor (DPV), la radiación neta (R_n) y la resistencia aerodinámica (r_a) para obtener una mejor predicción teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del cultivo. Esta aproximación es mejor que el método empírico, especialmente en climas húmedos (Keener y Kircher, 1983).

El método del IEHC ha tenido un gran uso práctico dentro de la programación del riego de cultivos en regiones áridas y semiáridas (Calado *et al.*, 1990; Itier *et al.*, 1993; Anconelli *et al.*, 1994; Jones, 1999; Orta *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2004; Simsek *et al.*, 2005; Erdem *et al.*, 2005). Esto se debe principalmente a que los sensores requeridos para utilizarlo son de fácil manejo. En la agricultura de riego, el costo económico y ecológico del agua es alto si se considera la incertidumbre en su disponibilidad acrecentada por el cambio climático, de ahí que el costo de los sensores para cuantificar las variables climáticas y el estrés hídrico puede justificar la inversión (Feldhake *et al.*, 1997).

Cuando un cultivo presenta estrés hídrico, los estomas se cierran y la transpiración decrece por lo que la temperatura de la hoja se incrementa. Cuando una planta transpira com-

pletamente, no hay estrés hídrico y la temperatura de la hoja oscila de 1 a 4 °C menos que la temperatura ambiental; en este caso el IEHC es cero. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, y la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira en mucho tiempo el IEHC es uno (Jackson *et al.*, 1982).

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) determinar los límites inferior y superior del IEHC para el cultivo de tomate de cáscara en la programación del riego, ii) conocer el efecto de la lámina de riego y el acolchado plástico en diferentes etapas fenológicas del cultivo en el índice de estrés hídrico para obtener modelos de predicción y iii) conocer el efecto del IEHC sobre el rendimiento de frutos del cultivo para la estimación del mismo y su relación con el potencial del agua en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental de la Estación Meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, situado geográficamente entre las coordenadas 19° 16' 52" latitud norte y 99° 39' 0" longitud oeste y altitud de 2,240 m. Se cultivó tomate de cáscara con sistema de riego por goteo durante el periodo comprendido entre los meses de marzo a junio de 2007. El clima de la localidad es del tipo Cb(Wo)(W)(i)g, que corresponde a un templado suhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica (entre 5 y 7 °C). La temperatura media anual es de 15.5 °C, mayo es el mes más caliente y enero el más frío. La precipitación media anual es de 664 mm.

El material vegetal que se utilizó fue una familia de medios hermanos maternos (F3) obtenida a partir de la variedad "CHF1-Chapingo" de la Universidad Autónoma Chapingo. La siembra de semillas para la producción de plántulas se realizó el 24 de febrero de 2007, en charolas de poliestireno de 200 cavidades, el sustrato utilizado fue *peat moss* más vermiculita (1:1), el trasplante fue realizado el 30 de marzo (día juliano=89) y la fecha de la última cosecha fue el 30 de junio (día juliano=181). El arreglo de plantación fue de 1.5 m entre hileras y 0.45 m entre plantas, obteniéndose una densidad de 14,815 plantas-ha⁻¹.

Las características físicas del suelo determinadas en campo fueron: textura franca arcillosa; densidad aparente de 1.25 y 1.35 g·cm⁻³ a las profundidades de 10 y 30 cm,

respectivamente; la densidad real de 2.35 g·cm⁻³ a los 10 cm y 2.39 g·cm⁻³ a los 30 cm de profundidad; el porcentaje de humedad a capacidad de campo fue de 29.6 % y el punto de marchitez permanente de 16.5 %. El espacio poroso o contenido volumétrico de humedad a saturación varía de 0.47 cm³·cm⁻³ a los 10 cm de profundidad y 0.43 cm³·cm⁻³ a los 30 cm.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se calculó con la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad 1$$

donde R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ·m⁻²·d⁻¹); G es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ·m⁻²·d⁻¹); T es la temperatura media diaria del aire (°C); u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m·s⁻¹); e_s es la presión de vapor a saturación (kPa); e_a es la presión de vapor actual (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹) y γ es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

El diseño experimental fue un factorial 5 x 2, con cinco niveles de lámina de riego: 40, 60, 80, 100 y 120 % de la ET_0 , los cuales fueron codificados para el análisis estadístico como: 0, 1, 2, 3 y 4 respectivamente y dos niveles de acolchado plástico; sin y con, codificados como 0 y 1 respectivamente. Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de 10 hileras de 35 m de longitud separadas, en donde se asignó un tratamiento.

El acolchado plástico de color plateado y negro se instaló a la mitad de cada unidad experimental correspondiente a una válvula. Las características del plástico son: ancho de 1.2 m, para una cama de 60 cm, perforación parcial con diámetro de 6.3 cm y espaciamiento de 45 cm. La instalación se hizo con la acolchadora mecánica que contiene dispositivos para construir la cama, fertilizar, tirar la cinta y colocar el plástico.

El método de riego fue por goteo con cintas, el cual fue evaluado con una eficiencia de uniformidad de 92 % según el método de Karmeli y Keller (1975). Las características nominales son: diámetro interno de 16 mm, flujo de 1 litro·h⁻¹, espacio entre emisores de 0.3 m, y presión máxima de 12 m de columna de agua.

Con la pistola de monitoreo ambiental equipado con un sensor que mide la radiación en la banda del infrarrojo emitida por los cuerpos hacia donde se apunta. Se realizaron las siguientes mediciones: temperatura del cultivo, temperatura del aire y la humedad relativa, con las cuales se determinó el *IEHC*. El microprocesador interno analizó

los datos obtenidos para generar un reporte instantáneo del estado en que se encontraba el cultivo; indicó si estaba demasiado húmedo, seco o dentro de los límites aceptables. Las mediciones se realizaron entre 12:00 y 15:00 horas, en días despejados.

El *IEHC* se calculó con la expresión propuesta por Idso (1981) y Jackson *et al.* (1981):

$$CWSI = \frac{(dT - dT_l)}{(dT_u - dT_l)} \quad 2$$

donde dT es la diferencia medida entre la temperatura del aire y del cultivo; dT_u es el límite superior de las temperaturas del aire menos la temperatura del follaje (cultivo sin transpiración); y dT_l es el límite inferior de las temperaturas del aire menos la temperatura del follaje (cultivo bien regado).

Para determinar el límite superior e inferior en la ecuación del *IEHC*, se usó el método desarrollado por Idso *et al.* (1981) que considera los cambios en los límites superior e inferior debido a la variación del déficit de presión de vapor (ecuación 3):

$$DPV = e_s - e_a \quad 3$$

donde e_s es la presión de vapor a saturación para una temperatura del aire dada; y e_a es la presión de vapor actual (presión parcial de vapor de agua en la atmósfera).

La humedad relativa se estimó mediante la ecuación (4)

$$HR = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad 4$$

La presión de vapor de agua a saturación (e_s) es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura (T en °C) dada y se calculó con la ecuación 5 (Allen *et al.*, 1998):

$$e_s(T) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right] \quad 5$$

La presión de vapor actual se obtuvo despejando e_a en la ecuación 4, así como usando la humedad relativa y la temperatura del cultivo medidas con la pistola de rayos infrarrojos.

Los parámetros de la regresión lineal o del límite inferior (ecuación 6a) se determinaron a partir de los tratamientos de 120 % de la lámina de riego con y sin acolchado plástico, es decir, al considerar donde las temperatura del cultivo fueron menores que la temperatura del aire, lo cual indicó un cultivo con transpiración, sin estrés hídrico y bien regado. El límite superior (ecuación 6b) se obtuvo a partir de las mediciones realizadas en el tratamiento

de 40 % de la lámina de riego sin acolchado plástico, porque el cultivo fue severamente estresado con problemas de transpiración y la temperatura del cultivo fue mayor que la temperatura del aire.

$$dT_i = a + b(DPV) \quad 6a$$

$$dT_u = a + b(e_s[T_a] - e_s[T_a + a]) \quad 6b$$

donde a es el valor del intercepto y b es la pendiente de la ecuación; $e_s(T_a)$ es la presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (kPa).

Con el propósito de encontrar una relación entre el índice de estrés y el rendimiento del cultivo, se hicieron análisis de regresión. Así fue posible seleccionar las funciones con mayores coeficientes de correlación (r) y determinación (r^2). Para relacionar el índice de estrés hídrico con el potencial del agua del suelo se colocaron sensores *watermark* con medidor electrónico de lectura digital entre 0 y 200 kPa a dos profundidades: 10 y 30 cm por tratamiento. Las lecturas se hicieron diariamente antes de la aplicación del riego entre las 8 y 9 horas.

Una vez obtenidos los datos promedio del *IEHC* para las diferentes etapas del cultivo en días soleados, así como el rendimiento de frutos y el potencial mátrico por tratamiento y por factores, se hicieron análisis de varianza y prueba de medias (Tukey $P \leq 0.05$), para comparar los tratamientos. El análisis de correlación se realizó para las variables continuas: rendimiento de frutos e índice de estrés hídrico. Después se realizaron análisis de regresión simple y múltiple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Límite inferior y superior del Índice de Estrés Hídrico del cultivo

Debido a que la pistola de rayos infrarrojos para medir el índice de estrés hídrico requiere días soleados y el método sugiere que sea la misma hora (de 12 a 15 horas), es decir, cuando la demanda hídrica del cultivo es alta, se tomaron datos para todos los tratamientos los días: 123, 136, 145, 147, 152, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167 y 178. Se inició el día 123 porque a partir de esta fecha se observó el efecto de la lámina de riego y el acolchado plástico en el estrés hídrico del cultivo.

De acuerdo con el método propuesto por Idso *et al.* (1981), en la Figura 1 se presentan los parámetros que definen los límites inferior y superior del *IEHC*. La ecuación que define el límite inferior del *IEHC* es: $T_c - T_a = 1.21 - 1.31DPV$ ($r^2 = 0.68$, $P < 0.01$, $n = 42$), donde $T_c - T_a$ está en $^{\circ}C$, y el *DPV* en kPa. Idso (1982) reportó la siguiente relación para límite inferior en el cultivo de jitomate $T_c - T_a = 2.86 - 1.96DPV$. Para el cultivo de maíz, Irmak *et al.* (2000)

encontraron la relación: $T_c - T_a = 1.39 - 0.86DPV$. Se observa que las relaciones son diferentes, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Bucks *et al.* (1985) quienes señalan que los valores del intercepto y la pendiente varían de acuerdo con el clima, tipo de suelo y especie cultivada.

La línea inclinada (Figura 1) representa la línea base sin estrés hídrico, es decir la diferencia entre la temperatura del aire y del cultivo durante periodos en que hubo un adecuado suministro de agua, a diferentes *DPV*; en este caso, se supone que los estomas se encontraban abiertos y que la diferencia estuvo en función del *DPV*, puesto que un aumento de éste implica un incremento del poder secante de la atmósfera y por ende de la transpiración de las plantas. La línea horizontal (límite superior, Figura 1) es la diferencia de la temperatura del aire y del cultivo asociada a períodos de mayor estrés (con limitaciones de agua), cuando no existe transpiración. El valor promedio fue de $2.8^{\circ}C$ con $n = 25$. Para el cultivo de maíz, Irmak *et al.* (2000) determinaron un valor promedio de $4.6^{\circ}C$, valor mayor al del presente estudio, el cual significa que el tomate de cáscara es más sensible a un posible estrés hídrico que el maíz.

Un *DPV* igual a cero indica que el aire contiene el máximo vapor de agua posible (humedad relativa = 100 %). El límite inferior del *IEHC* cambia como una función de la presión de vapor debido al *DPV*. El *IEHC* varía entre 0 y 1 cuando las plantas se someten a condiciones apropiadas de riego hasta condiciones totalmente de estrés hídrico. El límite inferior en este trabajo se desarrolló en un rango de *DPV* de 0.3 a 4.0 kPa. Gardner y Shock (1989) sugieren que es necesario que el rango del *DPV* varíe de 1 a 6 kPa para definir la línea base que puede ser usada en otras localidades.

El cálculo de el *IEHC* en forma gráfica (Figura 1) se puede realizar a partir de la siguiente relación: $IEHC = AC/BC$, donde el punto *A* es la diferencia entre las temperaturas de la hoja menos la del aire en el momento de medición, el punto *B* es la diferencia de temperatura máxima entre la

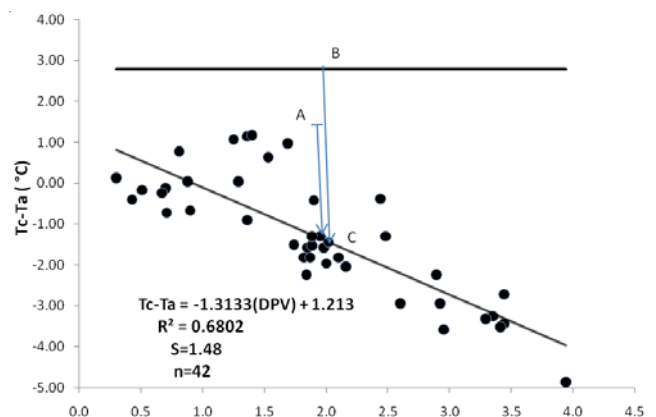


FIGURA 1. Límite inferior (A-C) y superior del cultivo (B-C) de tomate de cáscara para la determinación del índice de estrés hídrico del cultivo. S= Desviación estándar.

hoja y el aire (límite superior) y el punto C, la diferencia mínima (límite inferior) en las condiciones de *DPV* en las cuales se realizó la medición de temperatura de la hoja y aire (A). Por lo tanto, el *IEHC* está determinado por la distancia relativa entre la línea inferior (A-C) que representa las condiciones sin estrés y la línea superior (B-C) donde no hay transpiración. Por ejemplo, se considera que el punto A tiene un valor de $T_c - T_a$ igual que 1.4 °C correspondiente a un valor de *DPV* igual que 2.0 kPa. A partir de la definición de Idso (1981), la distancia entre el punto A y el límite inferior (C) es 2.8 °C y la distancia entre el límite superior e inferior en 2.0 kPa es 4.2°C. De esta manera, el *IEHC* es igual que la razón de ambas distancias relativas $2.8/4.2=0.66$. Esto significa que una diferencia de temperaturas de 1.4 °C entre el cultivo y el aire, puede originar problemas de estrés hídrico en el cultivo.

La termometría infrarroja para calcular el *IEHC* puede utilizarse en la programación de riegos del cultivo. Diversos investigadores han obtenido los parámetros del límite inferior y superior de otros cultivos (Idso, 1982; Jones *et al.*, 1997; Orta *et al.*, 2003; Erdem *et al.*, 2005).

Efecto de la lámina de riego y acolchado plástico en el índice de estrés hídrico

El análisis de varianza mostró que existen diferencias altamente significativas ($P<0.01$), del efecto de la lámina de riego en el *IEHC* en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, y no así para el efecto de acolchado plástico, siendo únicamente significativo para la etapa de maduración (M), en los días 161 y 165; el efecto de interacción, fue no significativo ($P>0.05$) en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo. De acuerdo con el análisis de comparación de medias ($P<0.05$) el acolchado presenta un promedio de 0.15 a 0.2 en la etapa vegetativa (V), mientras que sin acolchado se obtuvo un valor promedio de 0.21 a 0.26 (Cuadro 1). En las etapas reproductiva (R) y de maduración los valores promedio varían de entre 0.14 a 0.28 con acolchado y de 0.27 a 0.33 sin plástico (Cuadro 2).

En el Cuadro 2 se presenta la relación de las láminas de riego con el *IEHC*. En general, se puede notar que el tratamiento de 40 % de la lámina de riego, presenta los valores más altos de *IEHC* en las diferentes etapas de

CUADRO 1. Efecto del acolchado plástico en el índice de estrés hídrico en diferentes etapas de desarrollo del cultivo de tomate de cáscara.

Acolchado	Índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC)		
	V 123 (3-05-07) ^y	R.145 (25-05-07)	M.178 (27-06-07)
Sin Acolchado(0)	0.21 a	0.21 a	0.33 a ^z
Con Acolchado(1)	0.20 a	0.15 a	0.28 a
MEDIA	0.21	0.18	0.30
DSH	0.085	0.064	0.084
CME	0.012	0.007	0.012
CV(%)	54.15	45.76	36.38

^zValores con la misma letra dentro de columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P\leq 0.05$.

^yLa notación V 123 (3-05-07) indica que V es la etapa vegetativa, 123 el día juliano y (3-05-07) la fecha correspondiente al día, mes y año.

DSH: Diferencia Significativa Honesta.

CME: Cuadrado Medio del Error.

CV: Coeficiente de Variación.

CUADRO 2. Efecto de la lámina de riego en el índice de estrés hídrico en diferentes etapas de desarrollo del cultivo de tomate de cáscara.

Lámina de riego	Índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC)		
	V 123 (3-05-07) ^y	R 145 (25-05-07)	M 178 (27-06-07)
40 (0)	0.40 a	0.37 a	0.53 a ^z
60 (1)	0.17 b	0.22 b	0.42 ab
80 (2)	0.38 a	0.12 b	0.32 bc
100 (3)	0.08 b	0.10 b	0.11 cd
120 (4)	0.0 b	0.10 b	0.15 d
MEDIA	0.21	0.18	0.30
DSH	0.19	0.14	0.19
CME	0.012	0.007	0.012
C.V. (%)	54.15	45.76	36.38

^zValores con la misma letra dentro de columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P\leq 0.05$.

^yLa notación V 123 (3-05-07) indica que V es la etapa vegetativa, 123 el día juliano y (3-05-07) la fecha correspondiente al día, mes y año.

DSH: Diferencia Significativa Honesta.

CME: Cuadrado Medio del Error y CV: Coeficiente de Variación.

desarrollo del cultivo y es estadísticamente diferente al resto de los niveles. Los valores más bajos de *IEHC* se obtuvieron con las láminas de riego de 100 y 120 % de la ET_0 , siendo estadísticamente iguales que los niveles de 60 y 80 % de la ET_0 . Esto es debido a que se tuvo un suministro hídrico normal durante el ciclo del cultivo. A medida que disminuye la disponibilidad de agua para la planta, el índice aumenta hasta 0.7 en el tratamiento con restricciones severas de riego (40 %) sin acolchado plástico.

Las funciones que relacionan el índice de estrés hídrico con las láminas de riego y acolchado plástico fueron las siguientes.

En la etapa vegetativa con $r^2=0.74$, $CME=0.025$ y $n=30$:

$$IEHC_v = 0.73 - 0.135(a) - 0.418(b) + 0.061(b^2) + 0.037(ab) \quad 7$$

en la etapa reproductiva con $r^2=0.66$, $CME=0.007$ y $n=30$:

$$IEHC_r = 0.40 - 0.06(a) - 0.18(b) + 0.029(b^2) + 0.0003(ab) \quad 8$$

y finalmente para la etapa de maduración con $r^2=0.62$, $CME=0.020$ y $n=30$:

$$IEHC_m = 0.59 - 0.267(a) - 0.232(b) + 0.028(b^2) + 0.52(ab) \quad 9$$

donde a es el efecto del acolchado plástico; b representa la lámina de riego de Penman-Monteith; y ab es el efecto de interacción del plástico con la lámina de riego. Los coeficientes de determinación (r^2) son aceptables, e indican que los modelos predicen en forma aceptable el *IEHC* y los cuadrados medio del error son relativamente pequeños.

En las Figuras 2a, 2b y 2c se presentan las relaciones de las láminas de riego y el acolchado plástico con el *IEHC*, para las etapas vegetativa, reproductiva y maduración, respectivamente. Se grafican las ecuaciones 7, 8 y 9 sustituyendo el valor de 0 sin acolchado y 1 con acolchado y los valores de 0, 1, 2, 3 y 4 correspondientes a la reposición de las láminas de riegos: 40, 60, 80, 100 y 120 %, respectivamente. Los modelos exponenciales se generaron a partir de los valores observados de los promedios obtenidos del *IEHC* sin y con acolchado plástico.

La relación entre el índice de estrés hídrico y la lámina de riego es negativa y exponencial, a medida que la lámina de riego aumenta el *IEHC* disminuye hasta llegar a 0 cuando se aplica el 100 o 120 % de la ET_0 . Las diferencias entre con y sin acolchado plástico, en las diferentes etapas fenológicas, indican que el valor de *IEHC* con acolchado es menor que sin acolchado plástico. Esto se debe principalmente a la reducción de la evaporación del suelo en los tratamientos con plásticos. Al respecto, Simsek et

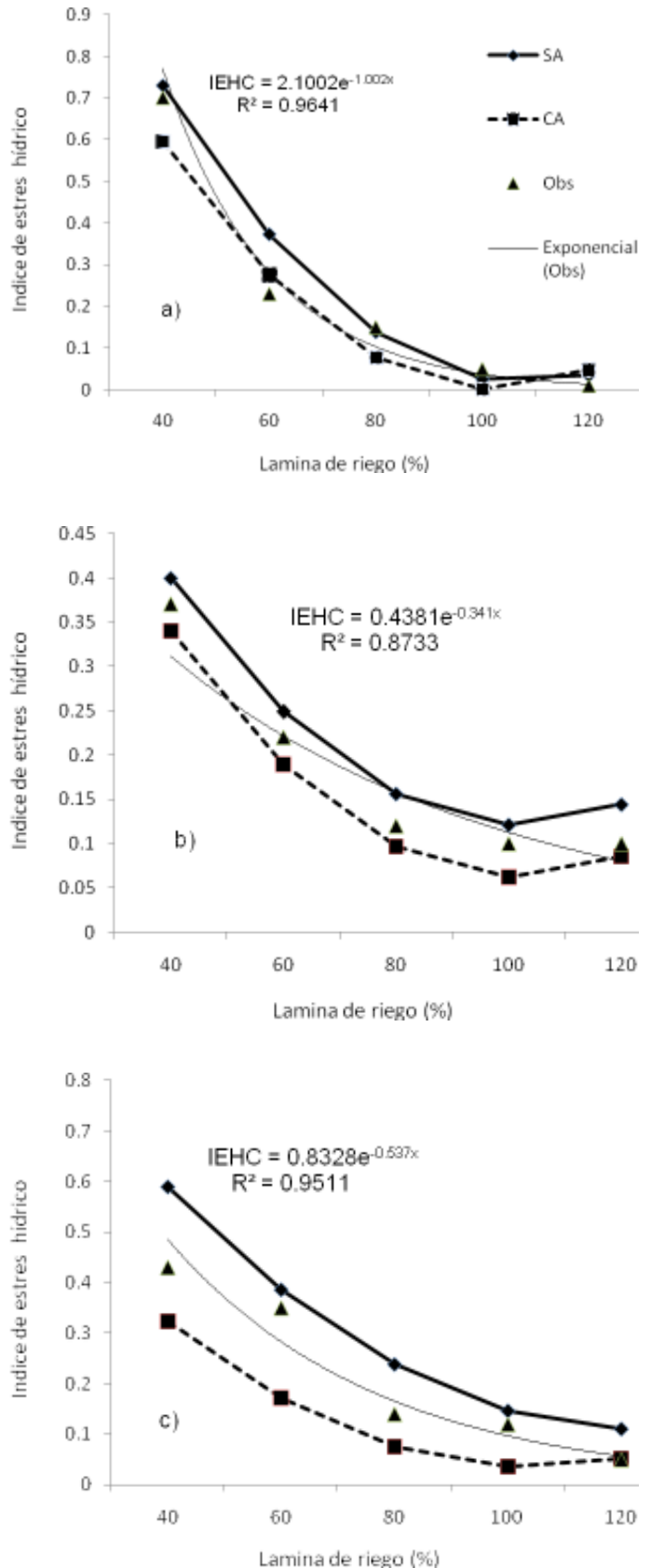


FIGURA 2. Estimación del índice de estrés hídrico en el cultivo de tomate de cáscara en las etapas: a) vegetativa, b) reproductiva y c) maduración del cultivo, sin (SA) y con acolchado plástico (CA) a partir de la lámina de riego calculada con la ET_0 de Penman-Monteith.

al. (2005) observaron que cuando disminuye la lámina de riego, la tasa de transpiración del cultivo también disminuye dando por resultado aumentos de temperaturas del cultivo y del *IEHC*; esto resulta en una disminución del rendimiento del cultivo.

La predicción del *IEHC* en la etapa vegetativa se puede realizar mediante la función exponencial: $y=2.1e^{-1.0x}$ con $r^2=0.96$ determinada a partir de los valores promedios asociados al efecto de la lámina de riego del día 136, es decir, considerando los valores obtenidos con y sin acolchado plástico. Para la etapa reproductiva se obtuvo la función exponencial $y=0.44e^{-0.34x}$ con $r^2=0.87$ determinada con base en los datos promedios observados del día 145 y en la etapa de maduración resultó la función $y=0.82e^{-0.53x}$ con $r^2=0.95$, determinada de acuerdo con los valores promedios observados en el día 165 (Figuras 2a, 2b y 2c). El umbral de *IEHC* varía de acuerdo con el uso o no de acolchado plástico. En general, se puede notar que con la lámina de riego calculada con el 60 % de la ET_0 se puede evitar el estrés hídrico del cultivo, tanto con y sin acolchado plástico.

Efecto del índice de estrés hídrico en el rendimiento de frutos

El rendimiento de fruto se correlacionó directamente con valores promedio de *IEHC* en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, tanto en los tratamientos con acolchado como sin acolchado. Así, la relación con mayor valor de $r=-0.81$ y significancia ($P<0.01$) es $Y=52.53-69.7IEHC$ con una r^2 de 0.65 y $n=30$. Esto significa que cuando el *IEHC* es igual que cero, el rendimiento de frutos es de $52.53 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, y a medida que el *IEHC* se incrementa hasta 0.7, el rendimiento se reduce hasta en $3.74 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Al respecto, Reginato (1983) y Howell *et al.* (1984) encontraron relaciones lineales entre el rendimiento y el *IEHC* promedio en el cultivo de algodón. Idso (1981) y Abdul-Jabbar *et al.* (1985) encontraron una relación lineal para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Irmak *et al.* (2000) encontraron que un polinomio cuadrático puede ser usado para predecir el rendimiento potencial del cultivo de maíz a partir del *IEHC*.

La Figura 3a muestra la ecuación sin acolchado: $Y=31.9-24.88(IEHC)$ con una r^2 de 0.63 y $n=15$ y la Figura 3b presenta la relación con acolchado: $Y=63.4-46.1(IEHC)$ con una r^2 de 0.45 y $n=15$. Estas funciones indican que el rendimiento del cultivo comienza a decrecer cuando el *IEHC* presenta cualquier valor diferente de cero. Cuando $IEHC=0.3$, el rendimiento de frutos de tomate de cáscara disminuye a $24.4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en los sistemas sin acolchado, y se reduce a $49.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con acolchado plástico. La diferencia de $25.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ es a favor del acolchado. Gardner *et al.* (1992) reportaron que los cultivos de maíz, trigo y algodón toleran un *IEHC* mayor a valores de 0.2 a 0.3 sin reducir significativamente el rendimiento económico de los cultivos.

Los valores promedio del *IEHC* variaron de acuerdo con el contenido de humedad del suelo inducido por las

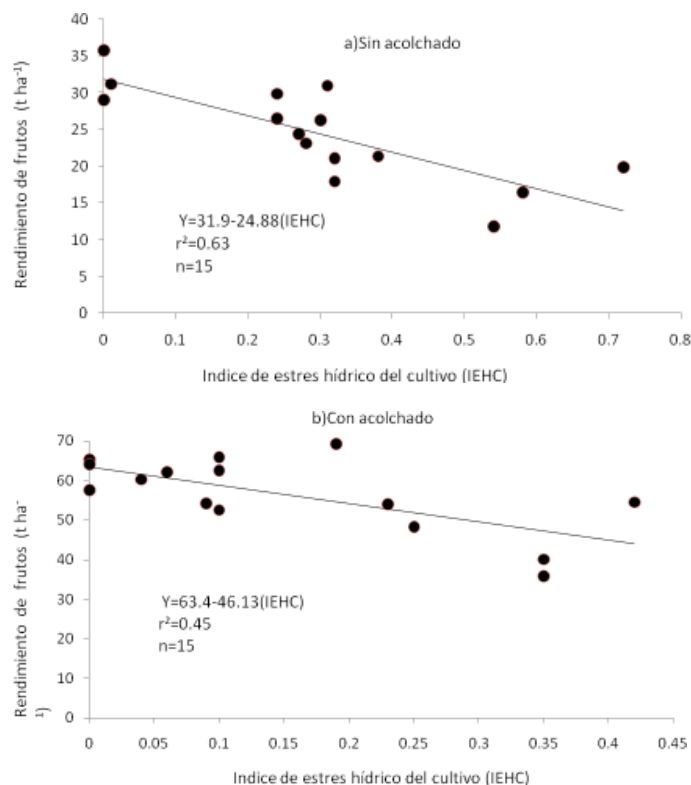


FIGURA 3. Rendimiento de frutos del tomate de cáscara ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$); a) sin y b) con acolchado plástico como una función lineal del índice de estrés hídrico del cultivo.

láminas de riego. Con la lámina de riego del 100 % de la ET_0 resulta un valor observado de $IEHC=0.15$, el cual produce un rendimiento de $28.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sin acolchado plástico, y de $56.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con plástico. Al respecto, Orta *et al.* (2003) también encontraron que el rendimiento más alto y un uso eficiente del agua en el cultivo de sandía se tienen en condiciones de reposición del 100 % de la humedad del suelo consumida por evapotranspiración y aumento del *IEHC* con el déficit creciente del agua en el suelo.

Efecto del potencial del agua en el suelo sobre el índice de estrés hídrico del cultivo

El *IEHC* aumentó con el déficit de humedad en el suelo, especialmente en los tratamientos sin acolchado plástico. Las ecuaciones lineales obtenidas para predecir el *IEHC* a partir del potencial del agua en el suelo (PA) fueron: $IEHC=0.065+.009(PA)$ con $r^2=0.74$, para 10 cm de profundidad y $IEHC=0.2+.002(PA)$ con $r^2=0.64$, a 30 cm de profundidad. El *IEHC* aumenta linealmente cuando disminuye el potencial mátrico, es decir, cuando el suelo se seca en forma gradual (Figuras 4a y 4b). Resultados similares fueron obtenidos por Erdem *et al.* (2005), quienes demostraron que los valores del *IEHC* se incrementaron con la disminución del contenido de humedad del suelo, aunque los valores del *IEHC* disminuyeron después del riego. Así también, Reginato y Garrot (1987) y Carcova *et al.* (1998) relacionaron el *IEHC* con la disponibilidad del agua en el suelo.

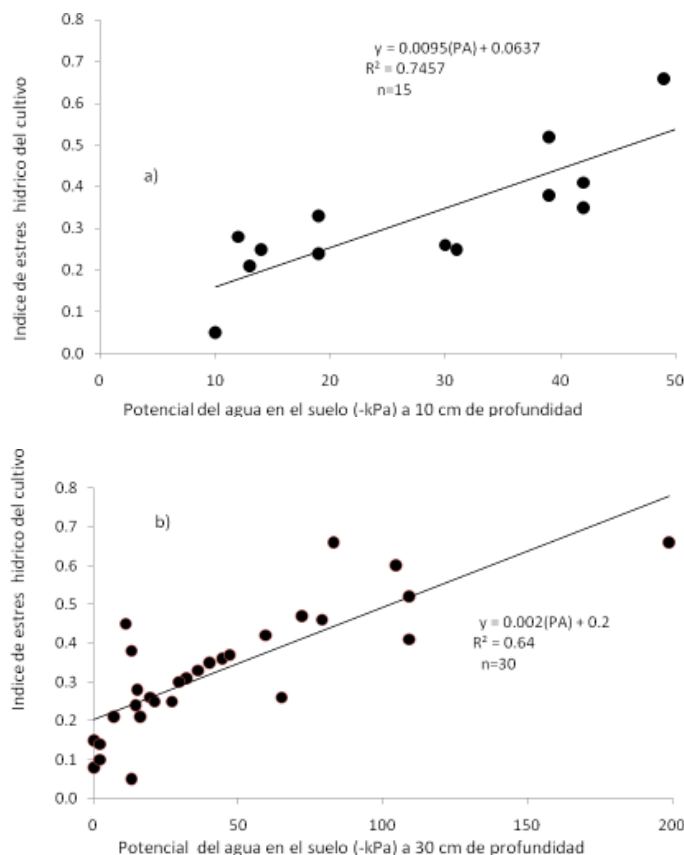


FIGURA 4. Estimación del índice de estrés hídrico del cultivo a partir del potencial del agua en el suelo, a) en la profundidad de 10 cm y b) profundidad de 30 cm.

El efecto del potencial matricial del suelo en el *IEHC* presenta diferencias entre las profundidades de 10 y 30 cm de acuerdo con los modelos lineales obtenidos. A la profundidad de 10 cm se puede observar que cuando el potencial varía entre -10 y -30 kPa, el *IEHC* alcanza valores de 0.15 y 0.33, respectivamente. Mientras que en la profundidad de 30 cm, con los mismos valores del potencial matricial, resultaron *IEHC* de 0.22 y 0.26, respectivamente (Figuras 4a y 4b). Estas diferencias son más notorias, cuando disminuye el potencial hasta -50 kPa, pues se tiene un *IEHC* de 0.51 y 0.3 para 10 y 30 cm de profundidad, respectivamente.

Para la calendarización del riego basada en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el ciclo fenológico del cultivo, se considera mantener el suelo con humedad de -10 a -50 kPa. Así, el agua puede ser mejor aprovechada por la planta. El seguimiento de la evolución del contenido de agua en el suelo durante el ciclo del cultivo, con riego por goteo, permite determinar un límite superior fijado para evitar drenaje (-10 kPa) y, por lo tanto, el lavado de fertilizantes. El límite inferior (-50 kPa) representa el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico. Lo anterior, indica que la medición del potencial del agua en el suelo puede ser un indicador del

estado hídrico de las plantas cuando los sensores se colocan a la profundidad donde la zona radical es más activa con base en la etapa fenológica del cultivo.

CONCLUSIONES

El uso de la termometría infrarroja para calcular el *IEHC* es una técnica confiable de monitoreo en la programación de riegos a partir de la ecuación determinada del límite inferior y superior en el cultivo de tomate de cáscara. Su uso en la etapa inicial del cultivo se limita debido al tamaño del dosel.

Los valores de *IEHC* cercanos a cero correspondieron a los tratamientos en que se repuso la totalidad de la lámina de riego (100 y 120 % de la ET_0) durante el ciclo del cultivo. A medida que disminuyó la disponibilidad de agua para la planta, el índice aumentó hasta 0.7 en el tratamiento con restricciones severas de riego (40 % ET_0) sin acolchado plástico. Los modelos que predicen el *IEHC* a partir de la lámina de riego se ajustan aceptablemente a los valores observados del *IEHC*.

El rendimiento de fruto se correlacionó directamente con valores promedios de *IEHC* ($r = -0.81$) y se obtuvo una relación lineal negativa. Estos modelos predicen en forma aceptable el rendimiento de fruto. El *IEHC* puede estimarse a partir del potencial del agua en el suelo (PA) a los 10 cm y 30 cm de profundidad. El *IEHC* aumenta linealmente conforme disminuye el potencial del agua en el suelo o se reduce su contenido de humedad.

LITERATURA CITADA

- ABDUL-JABBAR, A. S.; LUGG, D. G.; SAMMIS, T. W.; GAY, L. W. 1985. Relationship between crop water stress index and alfalfa yield and stress between irrigations and evapotranspiration. *Trans. ASAE* 28: 454-461.
- ALLEN, G. R.; PEREIRA S. L.; RAES D; SMITH M. 1998. *Crop Evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 300 p.
- ANCONELLI, S.; MANNINI P.; BATTILANI, A. 1994. *IEHC* and baseline studies to increase quality of processing tomatoes. *Acta Horticulturae (ISHS)* 376:303-306. V International Symposium on the Processing Tomato. http://www.actahort.org/books/376/376_40.htm
- BUCHNER, R. P.; GOLDFAMER, D. A.; SHAW, D. A. 1994. *Irrigation scheduling in kiwifruit growing and handling*, J. K. HASEY; R. S. JOHNSON; J. A. GRANT; W. O. REIL (eds.) University of California Publication 3344: 43-49.
- BUCKS, D. A.; NAKAVAMMA, F. S.; FRENCH, O. F.; REGARD, W. W.; ALEXANDER, W. L. 1985. *Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress*. *Agricultural water management* 10: 61-79.
- CALADO, A. M.; MONZON, A.; CLARK, D. A.; PHENE, C. J.; MA, C.; WANG, Y. 1990. *Monitoring and control of plant water stress in processing tomatoes*. *Acta Horticulturae (ISHS)* 277: 129-136. http://www.actahort.org/books/277/277_14.htm

- CÁRCOVA, J.; MADDONNI, A. G.; GHERSA, C. M. 1998. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality. *Field Crops Research*, Volume 55, Issues 1-2: 165-174
- GARDNER, B. R.; SHOCK C. C. 1989. Interpreting the crop water stress index. ASAE Paper 89-2642. ASAE, St. Joseph, MI.
- GARDNER, B. R.; NIELSEN, D. C.; SHOCK, C. C. 1992. Infrared thermometry and the crop water stress index. I. History theory, and baselines, *Journal Production. Agricultural*. 5: 462-466
- ERDEM, Y.; ERDEM, A. T.; ORTA H.; OKURSOY H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (IEHC). *Journal of Central European Agriculture*. Volume 6. No. 4: 449-460.
- FELDHAKA, C. M.; GLENN, D. M.; EDWARDS, W. M.; PETERSON, D. L. 1997. Quantifying drought for humid, temperate pastures using the Crop Water Stress Index (IEHC). *New Zealand. Journal of Agricultural Research*, Vol. 40: 17-23
- GIULIANI, R.; MAGNANINI, E.; FLORE, J. A. 2001. Potential use of infrared thermometry for the detection of water deficit in apple and peach orchards. *Acta Horticulturae (ISHS)*. 557: 38-43.
- HOWELL, T. A.; HATFIELD, J. L.; YAMADA, H.; DAVIS, K. R. 1984. Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress. *Trans. ASAE* 27: 84-88.
- IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*: 24: 45-55.
- IDSO, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27: 59-70.
- IRMAK, S.; HAMMAN D. Z.; BASTUG. R. 2000. Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing and Yield Estimation of Corn. *Agronomy. Journal*. 92: 1221-1227.
- ITIER, B.; FLURA, D.; BELABBES, K. 1993. AN ALTERNATIVE WAY FOR C.W.S.I. calculation to improve relative evapotranspiration estimates-results of an experiment over soybean. *Acta Horticulturae (ISHS)* 335: 333-340 http://www.actahort.org/books/335/335_40.htm.
- JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17: 1133.
- JACKSON, R. D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. In *Advances in Irrigation*, Volume 1. D.I. Hillel, Editor. Academic Press. p. 43-85.
- JONES, H. G.; AIKMAN, D.; MCBURNEY, T. A. 1997. Improvements to infra-red thermometry for irrigation scheduling in humid climates. *Acta Hort. (ISHS)* 449:259-266. http://www.actahort.org/books/449/449_37.htm.
- JONES, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 95(1999) 139-149
- KARMELI, D.; KELLER, J. 1975. Trickle irrigation design. 1st. edition. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, Glendora, California U.S.A. 133 p.
- KEENER, M. E.; KIRCHER, P. L. 1983. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agricultural meteorology* 28: 339-349.
- ORTA, A. H.; ERDEM Y.; ERDEM T. 2003. Crop water stress index for watermelon. *Scientia Horticulturae*, Volume 98, Issue 2: 121-130.
- REGINATO, R. J. 1983. Field quantification of crop water stress. *Trans. ASAE* 26: 772-775.
- REGINATO, R. J.; GARROT, D. J. 1987. Irrigation scheduling with the crop water stress index. p. 7-10. In: *Western Cotton Production Conf. Summary Proc.*, Phoenix, AZ. Cotton Growers Assoc., Memphis, TN.
- SIMSEK M.; TONKAZ T.; KAÇYRA, M. ÇÖMLEKÇIOĞLU N.; DOĞAN Z. 2005. The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. *Agricultural Water Management*, Vol: 73: 3.
- YUAN, G.; LUO, Y.; SUN, X.; TANG, D. 2004. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, Vol. 64: 29-40.