

ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO COMO UN INDICADOR DEL MOMENTO DE RIEGO EN CULTIVOS AGRÍCOLAS*

WATER STRESS INDEX AS AN INDICATOR OF IRRIGATION TIMING IN AGRICULTURAL CROPS

Rutilo López López¹, Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña³, Irineo López Cruz² e Ignacio Sánchez Cohen⁴

¹Campo Experimental Huimanguillo, km 1 carretera Huimanguillo-Cárdenas, Huimanguillo, Tabasco, México. C. P. 86400, Tel. 01 917 3750516 Fax: 9173750397. ²Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5, carretera México-Texcoco, Chapingo, México. C. P. 56230, Tel. 01 595 9521551, Fax. 5959521551, (arteagar@correo.chapingo.mx) (ilopez@correo.chapingo.mx). ³Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5, carretera México-Texcoco, Chapingo, México. C. P. 56230, Tel. 01 595 9521551, Fax. 5959521551, (mavazquez.coahuila@gmail.com). ⁴Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, INIFAP, km. 6.5 Canal Sacramento Zona industrial Gómez Palacio Durango, México. Tel. 01 871 7191076 y 7191077, Fax: 8717191134, (sanchez.ignacio@inifap.gob.mx). *Autor para correspondencia: lopez.rutilo@inifap.gob.mx.

RESUMEN

El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), se basa en la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor. Los objetivos de este ensayo fueron: presentar los aspectos teóricos y metodológicos del CWSI y la utilidad práctica que tiene para la programación del riego en los cultivos agrícolas. El método CWSI ha tenido uso práctico en regiones áridas y semiáridas debido a que el equipo requerido para su implementación es de fácil manejo. Este método, también se puede utilizar en regiones con clima húmedo, donde los cultivos requieren riego en la época seca y la radiación solar es alta. El CWSI se basa en la teoría del balance de energía en una superficie, las funciones lineales del diferencial de temperatura entre el cultivo y el aire y el déficit de presión de vapor, las cuales dependen del cultivo y las condiciones atmosféricas. La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica y confiable para la estimación del estrés hídrico, la programación del riego y la predicción de rendimiento. El objetivo de este ensayo fue presentar los aspectos teóricos y metodológicos del índice

de estrés hídrico de los cultivos, así como la utilidad práctica que tiene en la calendarización y optimización del agua de riego en los cultivos agrícolas.

Palabras clave: estrés hídrico, predicción de rendimiento, programación del riego.

ABSTRACT

Crop water stress index (CWSI) is based on the determination of the actual crop transpiration rate by means of the measurements of canopy temperature and vapor pressure deficit. The objectives of this assay were: to present theoretical and methodological aspects of CWSI and its practical application for irrigation scheduling. The CWSI method has been of practical use in arid and semiarid regions mainly because the required equipment to calculate it is easy to use. This method can also be utilized in humid regions where irrigation is needed during the dry season and there is high solar radiation. The CWSI is based on the theory of energy balance on a surface, the linear functions of the

differential temperature between the crop and the air and the vapor pressure deficit; which depends on the crop water status and the weather conditions. Infrared thermometry is a simple, practical and reliable tool to estimate crop water stress, irrigation scheduling and yield prediction.

Key words: water stress, irrigation timing, yield prediction.

INTRODUCCIÓN

En la programación del riego se han utilizado diversos métodos: determinación de la humedad del suelo, mediciones del estado energético del agua en el suelo, estimaciones de la demanda atmosférica y determinaciones del potencial hídrico de las plantas (Buchner *et al.*, 1994) o temperatura del dosel por medio de termometría infrarroja (Giuliani *et al.*, 2001). Otros métodos utilizados en la programación del riego, se basan en mediciones directas del crecimiento de algunos órganos de la planta con diferentes tipos de dendrómetros, asociados al uso de sensores de flujo de savia (basándose en el método del pulso de calor), para determinar el momento y la intensidad con la cual la disponibilidad de agua limita la transpiración del cultivo.

Las limitaciones críticas en el registro continuo del contenido de humedad en el suelo han sido resumidas recientemente por Van Leeuwen *et al.* (2001), en comparación con el monitoreo directo de las micro variaciones en el diámetro del tallo y del fruto, que han sido reconocidos por Ton *et al.* (2001) como indicadores más apropiados del déficit hídrico de poca intensidad y duración, producidos en condiciones de campo. El fitomonitorio es una técnica basada en la microelectrónica y la informática, que permite conocer en tiempo real el estado hídrico de la planta de una forma no destructiva, a través del registro de las respuestas anatómicas y fisiológicas de diversos órganos de las plantas, frente a las condiciones medioambientales y de manejo agronómico (Novak, 1997).

El método del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este enfoque metodológico es necesario para la correcta

programación del riego en cultivos agrícolas en campo abierto. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permiten maximizar el rendimiento a través de un manejo eficiente del riego (Garrot *et al.*, 1990).

El CWSI ha tenido un importante uso práctico dentro de la programación del riego 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; Şimşek *et al.*, 2005; Erdem *et al.*, 2005); esto se debe principalmente a que el equipo requerido es 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 del equipo para cuantificar las variables climáticas y el estrés hídrico puede justificar la inversión (Feldhake *et al.*, 1997). Los objetivos del presente ensayo bibliográfico fueron presentar los aspectos teóricos y metodológicos del índice de estrés hídrico de los cultivos, así como la utilidad práctica que tiene en la calendarización y optimización del agua de riego en los cultivos agrícolas.

Teoría del índice de estrés hídrico del cultivo

El agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. A partir de esto, Jackson *et al.* (1981) presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 - 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es 0. 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, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el CWSI es 1.

Idso *et al.* (1981) desarrollaron el método empírico (CWSI) para la cuantificación de la humedad atmosférica y de la planta en regiones áridas, la cual depende de la

determinación “de las líneas base sin estrés hídrico” que facilitan la normalización de cambios en la temperatura del dosel para condiciones ambientales. Sin embargo, estas líneas base son específicas del cultivo y están influenciadas por el clima (Bucks *et al.*, 1985). Además, Jackson *et al.* (1981) modificaron el CWSI para incluir una predicción más teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del dosel que incluye explícitamente el déficit de presión del vapor de agua, la radiación neta y la resistencia aerodinámica. Esta aproximación teórica para determinar la humedad atmosférica que se utiliza en el CWSI es más precisa que la aproximación empírica, particularmente en climas más húmedos (Keener y Kircher 1983).

El índice de estrés hídrico del cultivo según Idso (1981) y Jackson *et al.* (1981) está definido como:

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{li}]}{[(T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}]} \quad (1)$$

donde, T_c = temperatura del cultivo; T_a = temperatura del aire. El subíndice m denota la diferencia medida entre las dos temperaturas, el subíndice li (límite inferior) denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por disponibilidad del agua, de modo que la T_c es el valor más bajo para las condiciones del clima, y el subíndice ls (límite superior) denota la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero, como resultado de falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo planta atmósfera.

Se espera que el CWSI varíe entre 0 a 1 cuando las plantas van de una condición bien regada a una condición totalmente estresada. Puesto que no es normalmente factible medir simultáneamente la temperatura del cultivo sin estrés y un cultivo con estrés, los valores del límite inferior y superior de un dosel se pueden calcular mediante el análisis de balance de energía en la superficie. Este balance energético se puede expresar como:

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (2)$$

donde, R_n = radiación neta ($W m^{-2}$); G = flujo del calor en la superficie del suelo ($W m^{-2}$); H = flujo del calor sensible del aire ($W m^{-2}$); λE = flujo de calor latente ($W m^{-2}$). Los

términos H y λE en la Ecuación 2 son una función de los gradientes de la temperatura y de la presión de vapor respectivamente y se pueden expresar como:

$$H = \frac{\rho_a C_p (T_c - T_a)}{r_a} \quad (3)$$

y

$$\lambda E = \frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{\gamma (r_a + r_c)} \quad (4)$$

donde, ρ_a = densidad del aire ($kg m^{-3}$); C_p = calor específico del aire ($J kg^{-1} ^\circ C$); e_s = presión de vapor de agua a saturación (kPa) a T_c ; e_a = presión de vapor de agua actual del aire; γ = constante psicrométrica ($kPa ^\circ C^{-1}$); r_a = resistencia aerodinámica ($s m^{-1}$); r_c = resistencia del dosel al flujo de vapor de agua ($s m^{-1}$).

La Ecuación 2 puede ser simplificada asumiendo que $G = 0$. IR_n (Feldhake *et al.*, 1996) y por lo tanto, definiendo I_c como coeficiente de interceptación de la radiación igual a 0.9, de modo que la Ecuación 2 se convierte en:

$$I_c R_n = H + \lambda E \quad (5)$$

Cuando un volumen de aire se encuentra retenido sobre una superficie evaporante de agua, se alcanza un equilibrio entre las moléculas de agua que se incorporan al aire y las que regresan a la fuente de agua. En ese momento, se considera que el aire está saturado puesto que no puede incorporar ninguna molécula de agua adicional. La presión correspondiente se llama presión de vapor de agua a saturación (e_s). La cantidad de moléculas de agua que pueden ser incorporadas al aire depende de la temperatura (T). Mientras más alta es la temperatura del aire, más alta es la capacidad de incorporar vapor de agua y más alta es la presión de vapor a saturación (Figura 1). La pendiente de la curva cambia exponencialmente con la temperatura. A temperaturas bajas, la pendiente es pequeña y varía levemente con el incremento de temperatura. A temperaturas altas, la pendiente es mayor y pequeños cambios de temperatura producen grandes cambios en la pendiente. La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (Δ), es un parámetro importante para la descripción de la evaporación y se utiliza en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) con datos climáticos.

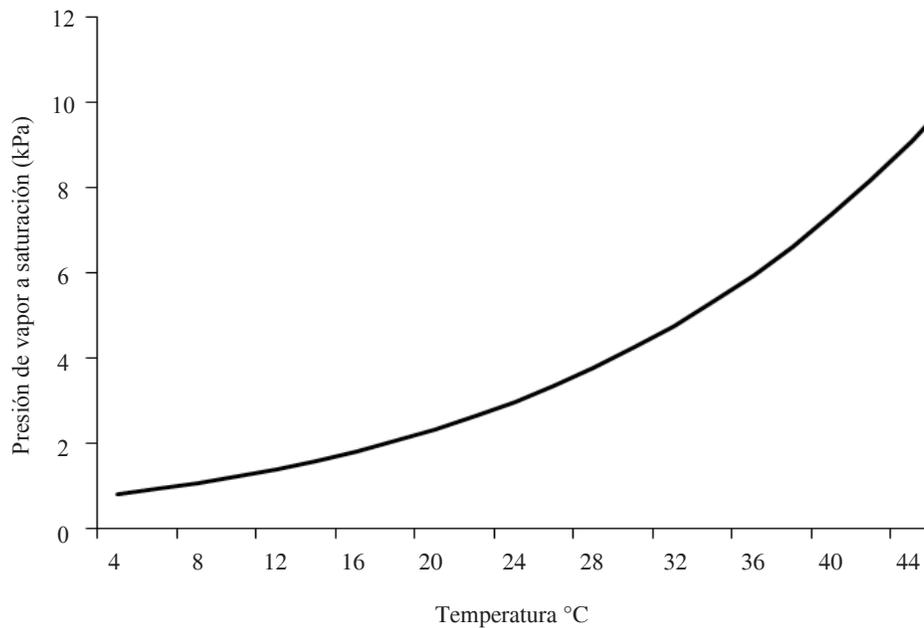


Figura 1. Relación entre temperatura y presión de vapor a saturación.

El valor de Δ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) se puede definir como:

$$\Delta = \frac{(e_s - e_a)}{(T_c - T_a)} \quad (6)$$

Jackson *et al.* (1988) encontraron que la pendiente (Δ) puede calcularse con:

$$\Delta = [45.03 + 3.014(T_c - T_a) + 0.05345(T_c - T_a)^2 + 0.00224(T_c - T_a)^3] (10)^3 \quad (7)$$

Combinando las Ecuaciones 3, 4, 5, y 6, la diferencia de la temperatura del cultivo y del aire, se puede estimar con la Ecuación 8:

$$T_c - T_a = \left[\frac{r_a I_c R_n}{\rho_a C_p} \right] \left[\frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right] - \frac{e_s - e_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (8)$$

Para calcular el límite superior ($T_c - T_a$)_{ls} cuando la evapotranspiración es 0, la r_c tiende al infinito y la Ecuación 8 se reduce a:

$$T_c - T_a = \frac{r_a I_c R_n}{\rho_a C_p} \quad (9)$$

Cuando la evapotranspiración no se limita por disponibilidad de agua y es igual a la tasa de referencia, r_c se aproxima a 0 y la Ecuación 8 se escribe como:

$$T_c - T_a = \left[\frac{r_a I_c R_n}{\rho_a C_p} \right] \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] - \frac{e_s - e_a}{\Delta + \gamma} \quad (10)$$

Como la r_c no llega a ser realmente 0 en la evapotranspiración de referencia, la constante psicrométrica γ se sustituye por γ^* en la Ecuación 10:

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_p}{r_a} \right) \quad (11)$$

donde, r_{cp} = resistencia del dosel en la evapotranspiración de referencia (s m^{-1}). La resistencia del cultivo se puede determinar mediante el método de O'Toole y Real (1986).

La resistencia aerodinámica puede calcularse con una ecuación semiempírica, según Thorn y Oliver (1977), que es:

$$r_a = \frac{4.72 \left\{ \ln \left[\frac{z - d}{z_0} \right] \right\}^2}{(1 + 0.54\mu)} \quad (12)$$

donde, z =altura de referencia (m); d =altura de desplazamiento (m); z_0 =longitud de la rugosidad (m); μ =velocidad del viento (m s^{-1}). Los términos z_0 y d se pueden calcular a partir de la altura de la planta (h), en cultivos con cobertura completa, estos parámetros se calculan con:

$$z_0 = 0.13h \quad (13)$$

y

$$d = 0.63h \quad (14)$$

Otra forma de desarrollar la ecuación de balance de energía para predecir la diferencia de la temperatura del cultivo y la temperatura del aire ($T_c - T_a$, °C), es ordenando los términos del balance de energía superficial (Jackson *et al.*, 1981):

$$T_c - T_a = X_1 X_2 - X_3 \quad (15a)$$

$$X_1 = \frac{r_a (R_n - G)}{(\rho_a C_p)} \quad (15b)$$

$$X_2 = \frac{\left[\gamma \left(I + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]}{\left[\Delta + \gamma \left(I + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (15c)$$

$$X_3 = \frac{(e_s - e_a)}{\left[\Delta + \gamma \left(I + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (15d)$$

De esta manera, la Ecuación 15b es igual a la Ecuación 9 y pueden ser utilizadas para obtener el límite superior (dT_{ls}) del *CWSI*, donde la resistencia del cultivo (r_c) se aproxima al infinito. Las Ecuaciones 15c y 15d se utilizan en el caso de un cultivo sin estrés hídrico (límite inferior), donde r_c se asume igual a cero.

El *CWSI* también se puede expresar en términos de la evapotranspiración, según Jackson *et al.* (1981):

$$CWSI = 1 - \frac{E}{E_p} \quad (16)$$

donde, E = evapotranspiración real del cultivo; E_p = evapotranspiración de referencia; sustituyendo sus valores se tiene:

$$CWSI = \frac{\gamma \left(I + \frac{r_c}{r_a} \right) - \gamma \left(I + \frac{r_p}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(I + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (17)$$

La relación r_c/r_a se expresa como:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{\frac{r_a R}{\rho C_p} - (T_c - T_a)(\Delta + \gamma) - (e_s - e_a)}{\gamma \left((T_c - T_a) - \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \right)} \quad (18)$$

donde, r_{cp} = resistencia del dosel de un cultivo bien regado; r_c = resistencia real del dosel; r_a = resistencia aerodinámica al transporte de calor sensible del aire.

La relación de la evapotranspiración real (E) y la de referencia (E_p) se aproxima más a los valores teóricos de Jackson (1982), debido a que no depende tanto de las condiciones de velocidad del viento como en la forma clásica según Idso *et al.* (1981). Al remplazar las estimaciones del DPV a partir de la temperatura mínima (Idso, 1982) por las mediciones de temperatura del aire de la radiación directa en las parcelas de riego, no sólo aumenta la correlación con la evapotranspiración real, además, corrige parcialmente la influencia de la temperatura superficial del suelo en valores pequeños del índice de área foliar (IAF). Por lo tanto, la exactitud de las estimaciones de la evapotranspiración por medio del *CWSI* se da por la relación de la evapotranspiración real (E) y el potencial hídrico de la hoja (E_p) en el amanecer (Itier *et al.*, 1993).

Aspectos metodológicos del índice de estrés hídrico en los cultivos

La evapotranspiración medida o real (E) dividida por la evapotranspiración de referencia (E_p), definida en la Ecuación 16 al despejar E/E_p queda como: $E/E_p = 1 - CWSI$, debido a las diferencias en las mediciones de $T_c - T_a$ vs DPV, el cultivo no requiere el riego hasta que el *CWSI* alcance un

valor umbral, el cual puede ser de 0.1 a 0.2, dependiendo del cultivo. En este tiempo el cultivo transpira en una tasa menor que el óptimo y el rendimiento del cultivo comienza a decrecer. El límite inferior de un cultivo en un lugar específico puede determinarse dos días después de que se aplique una lámina máxima de riego en el cultivo.

Los termómetros infrarrojos o buscadores térmicos se usan para medir la temperatura superficial del cultivo (Figura 2). Miden la cantidad de radiación de onda larga emitida de una superficie y se describe por la ley del cuerpo negro de Stefan-Boltzman en función de la temperatura.

$$I = \varepsilon \sigma T^4 \quad (19)$$

donde, I = radiación emitida por la superficie (W m^{-2}); σ = constante de Stefan-Boltzman ($5.674 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); ε = energía que emite un cuerpo a una temperatura dada, para el cuerpo negro es 1 y para otros es menor que 1; T = temperatura en la superficie ($^{\circ}\text{K}$).



Figura 2. Medición de los parámetros en el cálculo del índice de estrés hídrico con termómetro de rayos infrarrojos en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot).

Este método utiliza los datos de temperatura para el momento del riego y otra forma de expresarlo, reduciendo términos de la Ecuación 1), se escribe como:

$$CWSI = \frac{(dT - dT_i)}{(dT_s - dT_i)} \quad (20)$$

donde, dT = diferencia medida entre la temperatura del aire y del cultivo; dT_s = límite superior de las temperaturas del aire menos la temperatura del follaje (cultivo sin transpiración); dT_i = límite inferior de la temperatura del aire menos la temperatura del follaje (cultivo bien regado).

Para determinar el límite superior e inferior en la ecuación del CWSI, se usa el método desarrollado por Idso *et al.* (1981) que consideran los cambios en los límites superior e inferior debido a la variación del déficit de presión de vapor de agua (DPV). El DPV es la diferencia entre la presión de saturación y la presión actual de vapor (Ecuación 21) y es un indicador preciso de la capacidad real evaporante del aire.

$$DPV = e_s - e_a \quad (21)$$

donde, e_s = presión de vapor de agua a saturación a una temperatura del aire dada; e_a = presión de vapor de agua actual (presión parcial de vapor de agua en la atmósfera). Cuando el aire no se satura, la presión actual de vapor será más baja que la presión de vapor de saturación.

La presión de vapor de agua a saturación (e_s), en kPa, es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura (T en $^{\circ}\text{C}$) dada y se calcula con la siguiente ecuación:

$$e_s(T) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (22)$$

La presión de vapor de agua actual e_a se puede obtener de la Ecuación 23 utilizando la humedad relativa (HR) y la temperatura del cultivo medidas con el termómetro de rayos infrarrojos:

$$HR = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad (23)$$

Un DPV igual a cero indica que el aire sostiene el máximo vapor de agua posible (esto corresponde a una humedad relativa de 100%). El límite inferior del CWSI cambia en función de la presión de vapor del agua debido al DPV. El CWSI varía entre 0 y 1, cuando las plantas se someten a condiciones apropiadas de riego y hasta condiciones totalmente de estrés hídrico. Idso (1982) demostró que el límite inferior del CWSI es una función lineal del DPV para diversos cultivos y localidades como se puede observar en el Cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Parámetros de regresión lineal del índice de estrés hídrico en cultivos agrícolas en condiciones de cielo despejado.

Nombre común	Nombre científico	Intercepto (a) °C	Pendiente (b) °C kPa ⁻¹	Autor (año)
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i> L.	0.51	-1.92	Idso (1982)
Cebada (embuche)	<i>Hordeum vulgare</i>	2.01	-2.25	Idso (1982)
Cebada (floración)	<i>Hordeum vulgare</i>	1.72	-1.23	Idso (1982)
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	2.91	-2.35	Idso (1982)
Remolacha	<i>Beta vulgaris</i>	5.16	-2.30	Idso (1982)
Maíz (sin espiga)	<i>Zea mays</i> L.	3.11	-1.97	Idso (1982)
Frijol pelón	<i>Vigna unguiculata</i>	1.32	-1.84	Idso (1982)
Calabaza	<i>Cucurbita maxima</i>	4.88	-2.52	Idso (1982)
Lechuga (hoja)	<i>Lactuca sativa</i> L.	4.18	-2.96	Idso (1982)
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	1.17	-1.83	Idso (1982)
Soya	<i>Glycine max</i>	1.44	-1.34	Idso (1982)
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>	2.86	-1.96	Idso (1982)
Trigo (embuche)	<i>Triticum aestivum</i> L.	3.38	-3.25	Idso (1982)
Trigo (floración)	<i>Triticum aestivum</i> L.	2.88	-2.11	Idso (1982)
Maíz	<i>Zea mays</i> L.	1.39	-0.86	Irmak <i>et al.</i> (2003)
Sandía	<i>Citrullus vulgaris</i>	0.47	-1.20	Orta <i>et al.</i> (2003)
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i> L.	4.00	-1.88	Ajayi y Olufayo (2004)
Pasto Bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>	0.36	-1.84	Emekli <i>et al.</i> (2007)

Cuadro 2. Parámetros de regresión lineal de la diferencia de las temperaturas del cultivo y el aire respecto al déficit de presión de vapor de agua en algunos cultivos frutícolas.

Nombre común	Nombre científico	Intercepto (a) °C	Pendiente (b) °C kPa ⁻¹	Autor (año)
Nogal	<i>Carya illinoensis</i>	0.429	-0.606	Idso (1982)
Ciruelo	<i>Prunus cerasifera</i>	1.050	-1.140	Idso (1982)
Morera	<i>Morus alba</i>	0.332	-0.423	Idso (1982)
	<i>Gleditsia triachanthos inermis</i>	0.947	-0.972	Idso (1982)
Fresno	<i>Fraxinus velutina glabra</i>	2.360	-2.020	Idso (1982)

Una vez estimados los parámetros de la regresión lineal, la diferencia de la temperatura del aire y del dosel en un cultivo bien regado (límite inferior) y un cultivo severamente estresado (límite superior) se puede calcular los términos de la ecuación (20) como:

$$dT = a + b (DPV) \quad (24a)$$

$$dT_s = a + b [e_s(T_a) - e_s(T_c)] \quad (24b)$$

donde, DPV= déficit de presión de vapor de agua (kPa); $e_s(T_a)$ = presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (kPa); $e_s(T_a + a)$ = presión de vapor a saturación a la temperatura del aire más el valor del intercepto para el cultivo. De esta manera, con la

humedad atmosférica, humedad relativa, temperatura del bulbo húmedo, etc.), (temperatura del aire y temperatura de la hoja, es posible determinar el CWSI.

Se han determinado los parámetros de regresión lineal en diversos cultivos anuales (Cuadro 1) y cultivos frutícolas (Cuadro 2). Experimentalmente, diversos investigadores (Calado *et al.*, 1990; Itier *et al.*, 1993; Anconelli *et al.*, 1994; Jones, 1999; Orta *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2004; Erdem *et al.*, 2005; Şimşek *et al.*, 2005) han obtenido los parámetros de la regresión lineal en varios cultivos, donde la relación de las diferencias de temperaturas depende del DPV. Por ejemplo, en el cultivo de trigo, Alderfasi y Nielsen (2001) encontraron que la diferencia medida de la temperatura del dosel y del aire ($T_c - T_a$) se correlacionó negativamente con el DPV y se obtuvo una $r^2 = 0.88$ con $p = 0.0001$. Sin embargo, en algunos casos, el coeficiente de determinación puede ser bajo ($r^2 = 0.472$) debido a las pequeñas variaciones del DPV ocurridas en campo (Alkire y Simon, 1992).

En el cultivo de maíz, Irmak *et al.* (2003) encontraron la relación: $T_c - T_a = 1.39 - 0.86DPV$ ($r^2 = 0.92$; $n = 28$; $RMSE = 0.415$; $p < 0.01$; $SD = 1.33$) cuando hay transpiración; el valor promedio del límite superior fue de $+4.6$ °C, el cual indica que es la temperatura donde el cultivo deja de transpirar y por lo tanto, existe estrés hídrico en éste. Estos valores

cambian de acuerdo con el clima, tipo de suelo y especie del cultivo (Bucks *et al.*, 1985). En el cultivo de sorgo, Ajayi y Olufayo (2004) encontraron la relación: $T_c - T_a = 4.0 - 1.88DPV$ con datos de tres años, $n = 91$ y $r^2 = 0.71$. Para explicar la dispersión de las mediciones, la relación se evaluó como una función de la radiación global y la velocidad del viento.

El CWSI se puede calcular de manera gráfica determinando la distancia relativa entre la línea base inferior que representa las condiciones sin estrés y la línea base superior representando que no transpira, como se muestra en la Figura 3. La línea inclinada es la línea base sin estrés hídrico conocido como límite inferior, es decir, la diferencia entre la temperatura del aire y del dosel de un cultivo bien regado a diferentes DPV. La línea horizontal es la diferencia de la temperatura del aire y del dosel cuando no existe transpiración del cultivo. Esta línea es constante a diferentes DPV, donde la transpiración puede ocurrir en un DPV de 0. Por lo tanto, el cálculo de forma gráfica se realiza a partir de la siguiente relación: $CWSI = AC/BC$, 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 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).

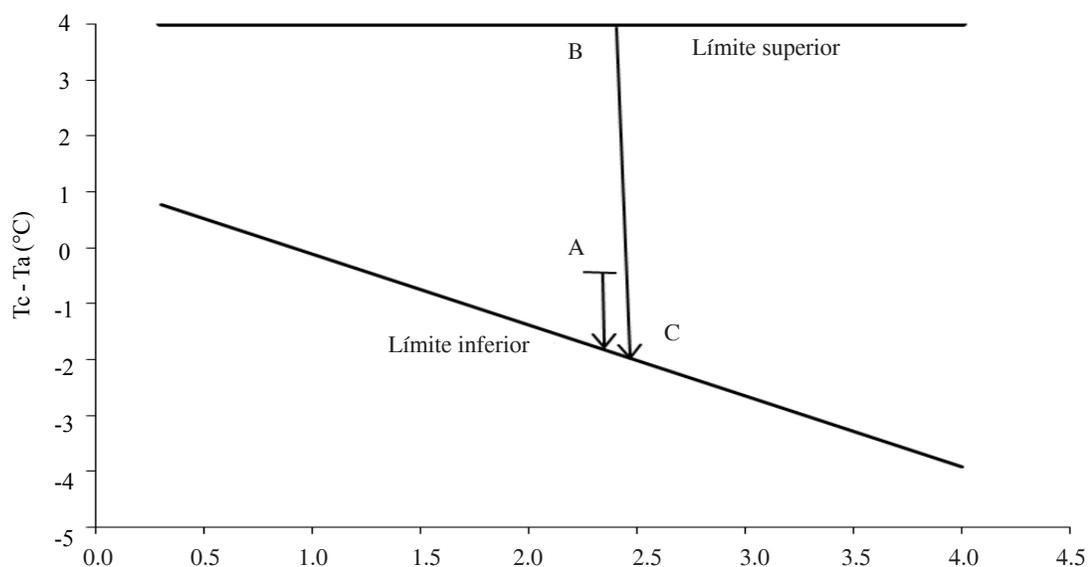


Figura 3. Índice de estrés hídrico de un cultivo equivalente a las mediciones de la distancia relativa de AC/BC entre la línea inferior y línea superior (Idso, 1981).

También se puede utilizar la conductancia estomática de la hoja estimada a través de la termometría infrarroja en la programación del riego, Jones (1999) desarrolló un procedimiento para determinar el CWSI con el valor teórico de la temperatura de la hoja o temperatura superficial de referencia estimada mediante un reordenamiento estándar del balance de energía de la hoja, expresando el CWSI como:

$$T_l - T_a = \frac{r_{HR}(r_{aw} + r_{lw})\gamma R_{ni}}{\rho_a C_p [\gamma(r_{aw} + r_{lw}) + \Delta r_{HR}]} - \frac{r_{HR} DPV}{\gamma(r_{aw} + r_{lw}) + \Delta r_{HR}} \quad (25)$$

donde, $T_l - T_a$ = diferencia de la temperatura de la hoja y del aire; r_{lw} = resistencia de la hoja al transporte de vapor de agua (se asume igual a la resistencia estomática); r_{aw} = resistencia de la capa límite al vapor de agua; R_{ni} = radiación neta isotérmica (radiación que recibe una superficie equivalente a la temperatura del aire); r_{HR} = resistencia paralela al calor y transporte radiactivo. Para el análisis de la resistencia (r_{aH}) se estima con la siguiente ecuación:

$$r_{aH} = 100 \sqrt{\left(\frac{d}{\mu}\right)} \quad (26)$$

donde, r_{aH} = resistencia de la capa límite de la hoja al transporte de calor ($s\ m^{-1}$); d = dimensión característica de la hoja (m); μ = velocidad del viento ($m\ s^{-1}$).

En una superficie seca, se tienen las mismas propiedades radiactivas y aerodinámicas, la pérdida de calor sensible es igual que la radiación neta absorbida, usando el concepto de radiación neta isotérmica se puede estimar la temperatura de una superficie seca (T_d) a partir de la temperatura máxima:

$$T_d - T_a = \frac{r_{HR} R_{ni}}{\rho_a C_p} \quad (27)$$

La temperatura correspondiente a la superficie húmeda (T_w) puede calcularse a partir de la Ecuación 25 estableciendo r_{lw} igual que cero, la cual resulta:

$$T_w - T_a = \frac{r_{HR} r_{aw} + r_{lw} \gamma R_{ni}}{\rho_a C_p [\gamma(r_{aw}) + \Delta r_{HR}]} - \frac{r_{HR} DPV}{\gamma r_{aw} + \Delta r_{HR}} \quad (28)$$

Restando la Ecuación 28 de la Ecuación 27 y dividiendo por la diferencia de temperaturas entre las Ecuaciones 25 y 27, se reduce a:

$$\left(\frac{T_d - T_w}{T_d - T_l}\right) = \frac{r_{lw} + r_{aw} + \left(\frac{\Delta}{\gamma}\right)r_{HR}}{r_{aw} + \left(\frac{\Delta}{\gamma}\right)r_{HR}} \quad (29)$$

La Ecuación 29 puede ser reordenada para obtener una expresión simple de la resistencia de la hoja:

$$r_{lw} = \left(r_{aw} + \frac{\Delta}{\gamma}\right)r_{HR} \frac{(T_l - T_w)}{(T_d - T_l)} \quad (30)$$

Una importante característica de la Ecuación 30 es que r_{lw} puede determinarse únicamente a partir de una combinación de mediciones de temperaturas de la hoja, de equivalencias de humedad y superficies secas y un término que depende sólo de la resistencia para calor y pérdida de humedad a través de la capa límite de la hoja. Es notable que este factor, en la ecuación no depende de la radiación neta absorbida o del déficit de presión de vapor del aire, sólo depende de las temperaturas. Debido a que el término $(T_d - T_l)$ en esta ecuación tiende a ser muy pequeño y es la diferencia entre dos cantidades de diversas variables en el campo, el comportamiento puede ser inestable, generalmente es preferible usar su inverso, la conductancia de la hoja (c_{lw}).

$$c_{lw} = \frac{(T_d - T_l)}{\left\{ (T_l - T_w) \left(r_{aw} + \left(\frac{\Delta}{\gamma}\right)r_{HR} \right) \right\}} \quad (31)$$

La tasa de transpiración está estrechamente relacionada con la conductancia, $mm\ s^{-1}$, también se puede encontrar en la literatura como unidades molar ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) y se obtiene simplemente multiplicando por 0.04, este factor es ligeramente sensible a la temperatura.

Una posibilidad de usar un índice de estrés de forma análoga en el CWSI, es sustituyendo T_d por la temperatura máxima (T_{max}) y T_w por la temperatura del límite inferior (dT_l).

$$CWSI_2 = \frac{(T_l - T_w)}{(T_d - T_w)} \quad (32)$$

Una alternativa para definir $CWSI_3$, que es proporcional a la resistencia estomática, por lo tanto, a partir de la ecuación (30) se puede escribir como:

$$CWSI_3 = \frac{(T_l - T_w)}{(T_d - T_l)} \quad (33)$$

Finalmente, a partir de la ecuación (31) se puede definir un índice ($CWSI_4$) el cual es proporcional a la conductancia estomática.

$$CWSI_4 = \frac{(T_d - T_l)}{(T_l - T_w)} \quad (34)$$

Por otra parte, De Lorenzi *et al.* (1993) probaron las tres versiones del $CWSI$: la aproximación teórica (Ecuación 1) difundida por Jackson *et al.* (1981), una modificación propuesta por Clawson *et al.* (1989), y el desarrollo original que considera el valor real de la resistencia del dosel en un cultivo bien regado. Los tres métodos fueron considerados útiles para calcular el estrés hídrico en cultivo de chile dulce a campo abierto. Concluyeron que los valores de $CWSI$ fueron influenciados fuertemente por la adaptación rápida de las plantas a la escasez de agua.

Yuan *et al.* (2004) evaluaron en trigo de invierno, el modelo empírico de Idso *et al.* (1981) (Ecuación 1), el modelo teórico de Jackson *et al.* (1981) (Ecuaciones 15a, 15b, 15c y 15d) y el modelo de Alves (citado por los mismos autores), que sustituye la temperatura superficial radiométrica por una temperatura superficial del “bulbo húmedo”, de tal forma que evita la medición de la resistencia superficial del cultivo. Los resultados muestran que el $CWSI$ basado en la definición de Jackson y Alves son mejores que el método empírico. Ambos métodos fueron herramientas útiles para evaluar el estrés hídrico, pero el $CWSI$ basado en el concepto de Alves es más práctico, mientras que el $CWSI$ basado en el concepto de Jackson es más aceptable en la cuantificación del estrés hídrico.

Aplicaciones del índice de estrés hídrico en la programación de riegos

Según Idso (1982), el $CWSI$ no es apropiado para regiones húmedas, debido a que en estas condiciones, generalmente no se presentan condiciones de sequía. Sin embargo, en

climas cálidos húmedo, como el sureste de México, se presentan de tres a cuatro meses con períodos de sequías, principalmente en el ciclo otoño invierno, período donde la cantidad de radiación solar es mayor y los cultivos agrícolas requieren el agua de riego para satisfacer sus necesidades hídricas. Jones *et al.* (1997) señalan que la humedad relativamente alta en climas húmedos y la variación de la velocidad del viento y de la radiación solar pueden limitar seriamente el uso del método original, pero demostraron que la sensibilidad del método mejora cuando se considera la temperatura de la hoja y no la temperatura del aire (como en el método de $CWSI$ original), es decir, la temperatura de las “hojas modelo” expuestas dentro del cultivo.

Diversos investigadores han desarrollado el método del $CWSI$ en la programación del riego (Howell *et al.*, 1984; O'Toole *et al.*, 1984; Reginato y Howe, 1985; Reginato y Garrett, 1987; Wanjura *et al.*, 1990). Sin embargo, otra de las desventajas de este método es que los valores del $CWSI$ son difíciles de obtener al inicio del ciclo de los cultivos a causa de la cobertura parcial del dosel. Al comienzo del ciclo, cuando las plantas son pequeñas o tienen escasa población, una parte de la superficie del suelo puede ser considerada por la pistola de rayos infrarrojos cuando se efectúa la medición.

Nielsen (1990) utilizó diferentes umbrales de $CWSI$ (0.2, 0.3, 0.4 y 0.5) en la programación del riego en el cultivo de soya (*Glycine max* L. Merrill.) con riego por goteo, aplicándose láminas de riego de 180, 181, 174 y 145 mm y los rendimientos obtenidos fueron 2 656, 2 566, 2 430, y 2 189 kg ha⁻¹ respectivamente. Los rendimientos se incrementaron ligeramente cuando aumentó la lámina de riego en 25 y 51 mm adicionales, y presentó las mismas tendencias cuando se incrementó el umbral de $CWSI$.

Anconelli *et al.* (1994) encontraron en el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), la respuesta en rendimiento de tres valores de $CWSI$, usados como umbrales para el momento del riego, los cuales fueron comparados con un control (sin riego). Con el riego se obtuvieron aumentos significativos en el rendimiento de frutos. Mientras que con el tratamiento sin riego se obtuvieron 35 t ha⁻¹ de fruto, los tratamientos de riegos con umbrales alcanzados de 0.6, 0.35 y 0.1 de $CWSI$ se obtuvieron rendimientos de frutos de 51, 57 y 60 t ha⁻¹ respectivamente. Las características organolépticas (sabor y aroma) se alteraron por el riego, pero se obtuvo una mejora en la proporción de sacarosa. No se observaron diferencias significativas en los umbrales de

CWSI de 0.1 y 0.35, concluyeron que el cultivo es capaz de soportar valores 0.35 de índice de estrés sin que haya disminución de la producción y calidad del fruto.

Calado *et al.* (1990) estudiaron los efectos de disminución del uso del agua en los indicadores de estrés hídrico en la producción de tomates con riego por goteo. Los tratamientos de riego fueron distribuidos en un diseño de bloques al azar, con cinco niveles de láminas de riego: 0.40 ET_c , 0.60 ET_c , 0.80 ET_c , 1.0 ET_c y 1.20 ET_c . El riego fue controlado automáticamente por una computadora usando la evaporación de tanque clase "A" adaptada a un sensor electrónico. Los parámetros de suelo y planta fueron seguidos sistemáticamente en forma manual y por computadora. Los resultados indicaron que: i) los sensores del potencial matricial del suelo (SMPS) pueden utilizarse en la programación y control del riego. Las mediciones simultáneas (suelo y planta) permite tomar decisiones correctas basadas en condiciones normales, ii) el método del CWSI es una herramienta en la programación o control del riego para caracterizar el estrés hídrico en plantas de jitomate. Se determinó una variabilidad significativa en este método, y iii) se encontraron algunas correlaciones significativas estadísticas entre los cambios del diámetro del tallo y potencial hídrico de la hoja.

Con base en los resultados de Garrot *et al.* (1990), Orta *et al.* (2003) determinan el índice de estrés hídrico en la programación de riego en el cultivo de sandía (*Citrullus vulgaris*) producida con riego por goteo, estudiaron los efectos de cinco niveles de láminas de riego (reposición de 100, 75, 50, 25 y 0% de la humedad consumida del suelo a partir de la profundidad de 0.90 m del suelo) en el rendimiento de frutos. El rendimiento más alto y uso eficiente del agua se obtuvo en condiciones de riego completo (reposición de 100% de la humedad consumida del suelo) durante dos años. El CWSI fue calculado a partir de mediciones de las temperaturas del cultivo, temperatura ambiental del aire y de los valores del déficit de presión de vapor para cinco niveles de láminas de riego, obteniéndose el siguiente límite inferior: $T_c - T_a = -1.2DPV + 0.47$ con $r^2 = 0.52$ y desviación estándar de 0.57. Las tendencias en valores de CWSI fueron constantes con los contenidos de humedad del suelo inducidos por el déficit del riego; el CWSI aumentó con el déficit creciente del agua en el suelo. Un promedio de CWSI alrededor de 0.41 antes del riego produjo un aumento en el rendimiento máximo, éste se correlacionó

directamente con valores medios de CWSI y se obtuvo la ecuación lineal: $Y = 91.143 - 66.077(CWSI)$, la cual se puede utilizar en la predicción del rendimiento.

Posteriormente, Erdem *et al.* (2005) a partir de los resultados anteriores evaluaron diferentes valores de umbral del CWSI para programar el riego en el cultivo de sandía (*Citrullus vulgaris*) producida con riego por goteo, los riegos se iniciaron cuando los valores de CWSI alcanzaron: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0 (sin riego). La cantidad total aplicada de láminas de riegos fueron: 342, 280, 248 y 193 y 0 mm respectivamente. La evapotranspiración máxima estacional fue de 412 mm, medida a partir del tratamiento de 0.2 de CWSI. Concluyeron que los niveles de láminas de riego afectaron significativamente el rendimiento de frutos y la producción más alta (76.3 t ha^{-1}) fue obtenida con el tratamiento de 0.2 de CWSI, los tratamientos 0.4 y 0.6 de CWSI fueron estadísticamente iguales comparado con el tratamiento de 0.2. La eficiencia máxima del uso del agua y la eficiencia del uso del agua de riego se obtuvieron a partir del tratamiento 0.6 de CWSI con 22.1 y 13.3 $kg\ m^{-3}$, respectivamente. Con base en estos resultados, el valor de 0.6 de CWSI puede utilizarse en la programación del riego en el cultivo de sandía.

Şimşek *et al.* (2005) realizaron estudios para determinar los efectos de diferentes láminas de riego por goteo en el rendimiento del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) y sus componentes, y para determinar un valor de umbral del CWSI basado en la programación del riego. Aplicaron cuatro tratamientos de riego: 50% (T-50), 75% (T-75), 100% (T-100) y 125% (T-125) de láminas de riego basado en la evaporación de tanque "A" acumulada cada tercer día. Los valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) fueron 633, 740, 815 y 903 mm en el primer año y 679, 777, 875 y 990 mm en el segundo año para T-50, T-75, T-100 y T-125, respectivamente. La producción comercial máxima del fruto se obtuvo con el tratamiento T-100 con 76.65 t ha^{-1} en 2002 y 68.13 t ha^{-1} en 2003. La producción de frutos se redujo notablemente cuando disminuyó la lámina de riego. La eficiencia del uso del agua varió de 7.37 a 9.40 $kg\ m^{-3}$ y 6.32 a 7.79 $kg\ m^{-3}$ en 2002 y 2003, respectivamente, mientras que las eficiencias del uso del agua del riego estuvieron entre 7.02 y 9.93 $kg\ m^{-3}$ en 2002 y entre 6.11 y 8.82 $kg\ m^{-3}$ en 2003. Cuando disminuyó la lámina de riego, la tasa de transpiración del cultivo disminuyó dando por resultado aumentos de temperaturas del dosel del cultivo y del CWSI, esto resultó en una disminución en el rendimiento. Un CWSI igual que

0.2 se considera como el valor umbral para el inicio del riego en el cultivo de pepino producido a campo abierto en condiciones semiáridas.

En el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*) Barbosa y Ramana (2005) concluyeron que el riego se debe iniciar cuando el CWSI se aproxima a 0.3. Después de un segundo evento de estrés, el cultivo requiere de tres días para su tasa normal de transpiración. La respuesta de CWSI con respecto de la temperatura del cultivo (T_c), r_c/r_a y R_n es evidente y probablemente es la fuente de error más importante en la determinación del CWSI.

Hutmacher *et al.* (1991) en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) encontraron que los valores de CWSI fueron altamente y linealmente correlacionados con el potencial hídrico del tallo. Concluyeron que el uso de la línea base sin estrés en el período vegetativo para calcular los valores durante la floración y llenado de vaina resultaron valores de 0.1 a 0.2 más altos que los determinados usando líneas base que depende de la etapa de crecimiento. En la programación del riego, sugieren el uso de dos líneas base, una para el período vegetativo y otra línea base determinada mediante una base de datos de los períodos de floración y llenado de vaina.

Carcova *et al.* (1998) validaron el método de Idso (1981) para determinar el CWSI y describieron el comportamiento del CWSI en tres híbridos de maíz (*Zea mays* L.) que crecieron en diferentes ambientes y calidad del suelo. Determinaron el efecto de la calidad del suelo y de los híbridos en relación con el CWSI y el agua disponible del suelo. El CWSI aumentó durante el período de crecimiento en todos los ambientes y híbridos. La relación entre CWSI y agua disponible del suelo fue significativo para los tres híbridos y los diferentes ambientes ($r^2= 0.52$, $n= 51$, $p< 0.001$). Un umbral mayor que 0.25, que se relacionó con 60% de agua disponible en el suelo, el cultivo presentó síntomas de estrés hídrico. Irmak *et al.* (2000) encontraron que cuando el valor promedio del CWSI en cualquier etapa de crecimiento es mayor que 0.22, el rendimiento de grano del cultivo de maíz disminuye. El polinomio cuadrático determinado para predecir el rendimiento del cultivo de maíz (Y) a partir del CWSI fue: $Y= -4.38CWSI^2+1.58CWSI+0.46$ con $r^2= 0.98$.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de valores umbrales de CWSI en algunos cultivos agrícolas para el momento del riego. La mayoría de los autores señalan que una vez alcanzado el umbral del CWSI es recomendable programar el riego para evitar daños por estrés hídrico y se disminuya el rendimiento de los cultivos.

Cuadro 3. Valores umbrales del índice de estrés hídrico para la programación del riego en algunos cultivos agrícolas.

Autor (año)	Cultivo	Umbral CWSI
Nielsen (1990)	Soya (<i>Glycine max</i>)	0.2
Garrot <i>et al.</i> (1990) y Orta <i>et al.</i> (2003)	Sandía (<i>Citrullus vulgaris</i> L.)	0.41
Hutmacher <i>et al.</i> (1991)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.)	0.1-0.2
Gardner <i>et al.</i> (1992)	Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	0.2-0.3
Anconelli <i>et al.</i> (1994)	Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	0.35
Anconelli y Battilani (2000)	Vid (<i>Vitis vinifera</i>)	0.4
Irmak <i>et al.</i> (2003)	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	0.22
Barbosa y Ramana (2005)	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	0.3
Erdem <i>et al.</i> (2005)	Sandía (<i>Citrullus vulgaris</i> L.)	0.6
Simsek <i>et al.</i> (2005)	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	0.2
Emekli <i>et al.</i> (2007)	Pasto Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)	0.1

En estudios realizados con pastos, Feldhake *et al.* (1997) encontraron que la relación entre CWSI y la relación E/E_p depende de la especie. Además que el CWSI predice más rápidamente el estrés hídrico en *Festuca arundinacea*

Schreb., que en *Dactylis glomerata* (E/E_p de 0.84 vs 0.70). Encontraron que la relación entre CWSI y E/E_p no es lineal, la relación es más sensible a niveles más altos de índice de estrés. Más tarde, Al-Faraj *et al.* (2001) estudiaron el

CWSI y las líneas base con el aumento de la tensión de humedad del suelo en el pasto *Festuca arundinacea* Schreb. Se midieron continuamente con termómetros infrarrojos las temperaturas del dosel del pasto, junto con la evapotranspiración del cultivo, medido con minilísimos electrónicos. Concluyeron que la diferencia de la temperatura del cultivo-aire ($T_c - T_a$) aumentó con la disminución del contenido de humedad del suelo. La $T_c - T_a$ aumentó cuando la radiación neta fue mayor, independiente de la tensión de humedad del suelo. La temperatura del dosel de plantas bien regadas disminuyó el índice en 2.4 °C por cada disminución de 1 kPa del DPV para todos los niveles de la radiación neta. Por cada aumento de 100 W m⁻² de la radiación neta, la temperatura del dosel de las plantas bien regadas se incrementó en un índice de 0.6 °C y mostró alta correlación (línea base sin estrés) con el DPV. El incremento de la temperatura del dosel junto con la disminución de la tasa de la transpiración fueron los signos del incremento del estrés hídrico. Sin embargo, las relaciones de la $T_c - T_a$ y la línea base del DPV tuvieron una correlación baja para las condiciones de estrés moderadas y severas sin importar los niveles de la radiación neta. Además, en ambiente controlado, al aumentar la precisión y número de repeticiones, el límite inferior de la línea base del estrés hídrico fue muy variable.

CONCLUSIONES

De los aspectos metodológicos y teóricos que han utilizado las diferentes formas como se ha expresado el CWSI, todos se basan en la teoría del balance de energía en el dosel del cultivo, las funciones lineales de la temperatura diferencial ($T_c - T_a$) y el déficit de presión de vapor que dependen del cultivo y las condiciones atmosféricas.

La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica, no destructiva y confiable para la estimación del estrés hídrico de los cultivos, la cual se ha aplicado en una diversidad de cultivos agrícolas en la programación del riego y es útil para la predicción de rendimientos.

El método del CWSI es oportuno y eficaz en la programación del riego cuando se determina el valor umbral en las diferentes etapas fenológicas del cultivo para evitar daños por estrés hídrico y disminuir el rendimiento de los cultivos.

LITERATURA CITADA

- Alderfasi, A. A. and Nielsen D. 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural water management*. 47:69-75.
- Al-Faraj, A.; Meyer, E. G. and Horst, L. G. 2001. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making a traditional method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31:107-124.
- Alkire, B. H., and Simon, J. E. 1992. Use of infrared thermometry to monitor water status in peppermint (*Mentha x Piperita* L.). *Acta Hort*. 306:385-396.
- Anconelli, S.; Mannini, P. and Battilani, A. 1994. CWSI and baseline studies to increase quality of processing tomatoes. *Acta Hort*. 376:303-306.
- Anconelli, S. and Battilani, A. 2000. Use of leaf temperature to evaluate grapevine (*Vitis vinifera*) yield and quality response to irrigation. *Acta Hort*. 537:124-138.
- Ajayi, A. E. and Olufayo, A. A. 2004. Evaluation of two temperature stress indices to estimate grain sorghum yield and evapotranspiration. *Agron. J*. 96:1282-1287.
- Barbosa da Silva, B., and Ramana, R. T. A. 2005. The CWSI variations of a cotton crop in a semi-arid region of Northeast Brazil. *J. Arid Environ*. 62:649-659.
- Bucks, D. A.; Nakavamma, F. S.; French, O. F.; Regard, W. W.; and Alexander, W. L. 1985. Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress. *Agricultural Water Management* 10:61-79.
- Buchner, R. P., Goldhamer, D. A. and Shaw, D. A. 1994. Irrigation scheduling in kiwifruit growing and handling, *In*: Hasey J. K.; Johnson, R. S.; Grant, J. A. and Reil, W. O. (eds.). University of California Publication 3344. p. 43-49.
- Calado, A. M.; Monzon, A.; Clark, D. A.; Phene, C. J.; Ma, C.; and Wang, Y. 1990. Monitoring and control of plant water stress in processing tomatoes. *Acta Hort*. 277:129-136.
- Cárcova, J.; Maddonni A. G.; and Ghersa, C. M. 1998. Crop water stress index of three maize hybrids grown in soils with different quality. *Field Crops Res*. 55:165-174.

- De Lorenzi, F.; Stanghellini, C. and Pitacco, A. 1993. Water shortage sensing through infrared canopy temperature: timely detection is imperative. *Acta Hort.* 335:373-380.
- Emekli, Y.; Bastug, R.; Buyuktas, D. and Yasemin, N. E. 2007. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. Akdeniz University, Faculty of Agriculture, Department of Farm Structures and Irrigation, Antalya, Turkey.
- Erdem, Y.; Erdem, A. T.; Orta H.; and Okursoy, H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). *J. Central European Agric.* 6:449-460.
- Feldhake, C. M.; Glenn, D. M.; and Peterson, D. L. 1996. Effect of drought on the thermal environment of a pasture soil surface. *Agron. J.* 88:652-656.
- Feldhake, C. M.; Glenn, D. M.; Edwards, W. M. and Peterson, D. L. 1997. Quantifying drought for humid, temperate pastures using the crop water stress index (CWSI). *N. Z. J. Agric. Res.* 40:17-23.
- Garrot Jr, D. J.; Ray, D.T.; Livingston, M.; Fangmeier, D. D. and Husman, S. H. 1990. Watermelon field irrigation management using the crop water stress index. *Acta Hort.* 278:755-762.
- Giuliani, R.; Magnanini, A. and Flore, J. A. 2001. Potential use of infrared thermometry for the detection of water deficit in apple and peach orchards. *Acta Hort.* 557:38-43.
- Howell, T. A.; Hatfield, J. L.; Yamada, H. and Davis, K. R. 1984. Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress. *Trans. Amer. Soc. Agric. Eng.* 27:84-88.
- Hutmacher, R. B.; Steiner, J. J.; Vail, S. S. and Ayars, J. E. 1991. Crop water stress index for seed alfalfa: influences of within-season changes in plant morphology. *Agricultural Water Management.* 19:135-149.
- Idso, S.B.; Jackson, R. D.; Pinter, P. J.; Reginato, R. J. and Hatfield, J. L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24:45-55.
- Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27:59-70.
- Irmak, S.; Hamman D. Z., and Bastug, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agron. J.* 92:1221-1227.
- Itier, B.; Flura, D. and Belabbes, K. 1993. An alternative way for CWSI. Calculation to improve relative evapotranspiration estimates-results of an experiment over soybean-. *Acta Hort.* 335:333-340.
- Jackson, R. D.; Idso, S. B., Reginato, R. J. and Pinter Jr, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133.
- Jackson, R. D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *In: advances in irrigation.* Volume 1. Hillel, D. I. Editor. Academic Press. p. 43-85.
- Jackson, R. D.; Kustas, W. P.; and Choudhury, B. J. 1988. A reexamination of the crop water stress index. *Irrig. Sci.* 9:309-317.
- Jones, H. G.; Aikman, D. and McBurney, T. A. 1997. Improvements to infra-red thermometry for irrigation scheduling in humid climates. *Acta Hort.* 449:259-266.
- Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agric. & For. Meteorol.* 95:139-149.
- Keener, M. E. and Kircher, P. L. 1983. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agric. Meteorol.* 28:339-349.
- Nielsen, D. C. 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). *Field Crops Res.* 23:103-116.
- Novak, V. A. 1997. Phytomonitoring in plant physiology. Arrangement and possibilities. *Russian J. Plant Physiol.* 44:121-128.
- Orta, A. H.; Erdem Y.; and Erdem T. 2003. Crop water stress index for watermelon. *Sci. Hort.* 98:121-130.
- O'Toole, J. C.; Turner, N. C.; Namuco, O. P.; Dingkuhn, M.; and Gomez, K. A. 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24:1121-1128.
- O'Toole, J. C., and Real, J. G. 1986. Estimation of aerodynamic and crop resistances from canopy temperature. *Agron. J.* 78:305-310.
- Reginato, R. J., and Garrot Jr., 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.*
- Reginato, R. J. and Howe, J. 1985. Irrigation scheduling using crop indicators. *J. Irrigation Drainage Engineering.* 3:125-133.

- Stanghellini, C. and De-Lorenzi, F. 1994. A comparison of soil and canopy temperature-based methods for early detection of water stress in a simulated patch of pasture. *Irrig. Sci. U.* 8:141:153.
- Şimşek, M.; Tonkaz T.; Kaçira, M.; Çömlekçioğlu, N.; and 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.* 73:240-252.
- Ton, Y.; Kopyt, M. K.; and Nilov, N. 2001. Phytomonitoring technique for tuning irrigation of vineyards. *Proc. International symposium on irrigation and water relations in Grapevine and Fruit Trees.* Mendoza, Argentina. p. 147-168.
- Thorn, A. S., and Oliver, H. R. 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 103:345-357
- Van Leeuwen, C.; Chone, X.; Tregoat, O.; and Gaudillere, J. P. 2001. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grapegrower and Winemaker.* 449:18-24.
- Wanjura, D. F.; Hatfield, J. L.; and Upchurch, D. R. 1990. Crop water stress index relationship with crop productivity. *Irrig. Sci.* 11:93-99.
- Yuan, G.; Luo, Y.; Sun, X.; and 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.* 64:29-40.