

Programación de riego con un índice térmico y su efecto sobre el crecimiento y rendimiento del maíz (*Zea mays* L.)

Programming of irrigation using a thermal index and its effect on the growth and performance of the corn



Raúl Rodríguez-García¹, José Antonio Morales-de la Cruz¹, Diana Jasso-de Rodríguez¹,
José Ángel Villarreal-Quintanilla¹ y Homero Ramírez-Rodríguez¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923. CP 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Email: rrodriguez_uaan@hotmail.com [*Autor responsable]. México. CP 25315. Tel.: 844 411 0296.
e-mail: jmarrey@uaan.mx* [*Autor responsable]

RESUMEN

Medir la temperatura de las hojas de un cultivo con un termómetro infrarrojo es un medio para detectar el estado hídrico en los cultivos, el método ideal porque no es destructivo, ya que las mediciones son a distancia y pueden escalarse de plantas individuales a campos enteros; con él pueden hacerse mediciones continuas menos costosas que con otros métodos alternativos. El índice térmico Crop Water Stress Index (CWSI) se desarrolló para, con la termometría infrarroja, detectar diferentes niveles de estrés hídrico y programar los riegos. Es una alternativa para monitorear los cultivos en forma extensiva. El objetivo de esta investigación fue evaluar diferentes niveles del CWSI y su efecto sobre el crecimiento y el rendimiento del maíz Var. Asgrow 7573. Los riegos se programaron a valores predeterminados de CWSI en las etapas vegetativa (V) y reproductiva (R): T1 = 0.25V-0.25R; T2 = 0.50V-0.35R; T3 = 0.75V-0.5R; T4 = 0.75V-0.60R; T5 = 0.75V-0.75R. El maíz se sembró el 17 de junio de 2016 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. El CWSI se determinó diariamente a mediodía solar. La evaluación de los tratamientos consistió en la medición del índice de área foliar (IAF), materia seca total (MST), rendimiento de grano (RG) y componentes de rendimiento de grano (CRG). Los análisis estadísticos mostraron diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos. En el menor valor del CWSI se obtuvo la mayor MST ($T1 = 26,815 \text{ Kg ha}^{-1}$) y RG ($T1 = 11,596 \text{ Kg ha}^{-1}$), y en el valor de mayor índice, la menor MST ($T3 = 19635 \text{ Kg ha}^{-1}$) y RG ($T3 = 9062.7 \text{ kg ha}^{-1}$). De acuerdo con los resultados, se concluyó que el CWSI puede ser una valiosa herramienta para monitorear el estado hídrico y programar el riego de maíz.

Palabras clave: CWSI, crecimiento, rendimiento, Var. Asgrow 7573, maíz

ABSTRACT

Crop leaves temperature measured with an infrared thermometer or other such remote sensors provides a means for detecting water status in crops. It is an ideal method because it is not destructive, measurements are remote, and they can be scaled from individual plants to whole fields; measurements can be taken continuously and be less expensive than other alternative methods. The Crop Water Stress Index (CWSI) was developed to be used with infrared thermometry to detect different levels of water stress and to program irrigation. This technique, little used in Mexico, is an alternative for extensive crop monitoring. The objective of the research was to evaluate different levels of CWSI and their effect on growth and yield of Asgrow 7573 maize. Irrigations were programmed using predetermined CWSI values in the vegetative (V) and reproductive (R) stages: T1 = 0.25V-0.25R; T2 = 0.50V-0.35R; T3 = 0.75V-0.5R; T4 = 0.75V-0.60R; T5 = 0.75V-0.75R. Maize was planted on June 17, 2016 at the Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, in Saltillo, Coahuila, under a random block design with four replicates. The CWSI was determined daily at solar noon. Treatment evaluation consisted in the measurement of leaf area index (LAI) and total dry matter (MST), grain yield (GR) and grain yield components (CRG). Statistical analyzes showed a significant difference ($p < 0.05$) between treatments. In the lower value of the CWSI, the highest MST ($T1 = 26,815 \text{ Kg ha}^{-1}$) and RG ($T1 = 11,596 \text{ kg ha}^{-1}$) were obtained and the lowest MST ($T3 = 19635 \text{ Kg ha}^{-1}$) and RG ($T3 = 9062.7 \text{ kg ha}^{-1}$). CWSI can be a valuable tool for monitoring water status and scheduling irrigation in maize.

Key words: CWSI, growth, yield, Var. Asgrow 7573, corn

INTRODUCCIÓN

La transpiración es un proceso que disipa parte de la energía solar absorbida por las hojas y regula su temperatura. La planta bajo estrés hídrico cierra los estomas y la transpiración se reduce, lo que disminuye la disipación de la energía solar y provoca un incremento de temperatura de las hojas, en tanto que las plantas sin estrés hídrico tienden a tener menor temperatura (Taghvaeian *et al.*, 2012). El índice de estrés hídrico del cultivo es un índice térmico que desarrollaron Idso *et al.* (1981), el cual ubican entre dos límites térmicos: uno de no estrés o límite inferior $(T_h - T_a)_{Li}$ y otro de máximo estrés $(T_h - T_a)_{Ls}$; con este índice se determinan valores diarios de diferencia de temperatura entre la hoja y el aire sobre el cultivo $(T_h - T_a)_x$. El rango de valores es 0 a 1, donde 0 es no estrés y 1 máximo estrés (ecuación x) (Idso *et al.*, 1982). Las mediciones de T_h se realizan utilizando radio termómetros (termómetro infrarrojo) o fotografía infrarroja, que se conoce como termometría infrarroja (Jackson *et al.*, 1981).

El monitoreo del estrés hídrico de los cultivos bajo riego es fundamental para optimizar su rendimiento. Para llevarlo a cabo es necesario un alto número de sensores que supervisen continuamente el estado hídrico del suelo y los cultivos (Playan *et al.*, 2014). La termometría infrarroja es un método ideal para controlar el estrés, debido a que no es un método destructivo, ya que las mediciones de temperatura de la hoja se hacen a distancia, y pueden escalarse de plantas individuales a campos enteros, además de que se pueden hacer mediciones, que resultan menos costosas que otros métodos alternativos (Nayak, 2005). Con el propósito de evaluar la aplicación del cwsí para programar los riegos se han realizado investigaciones en diferentes cultivos y lugares del mundo. En Colorado, USA, Alderfasi y Nielsen (2001) utilizaron este índice para programar riego en trigo y monitorear el estado hídrico de la planta; en Turquía, Orta *et al.* (2002) lo implementaron en girasol; Cremona *et al.* (2004) en colinabo, Erdem *et al.* (2006a y b) en frijol y papa, y en brócoli (2010); Sezen *et al.* (2014) evaluaron el índice para programar riego en pimiento morrón bajo riego por surcos y goteo.

La aplicación del cwsí en maíz ha sido el tema de numerosos estudios recientes. Chen *et al.* (2010) evaluaron índices de intensidad y grado de sequía del suelo y el cwsí para programar el riego en maíz, y determinaron que estos índices deben comple-

mentarse con el cwsí para programar el riego. Irmak *et al.* (2000), en la región mediterránea de Turquía, evaluaron en maíz tres niveles de abatimiento de la humedad disponible del suelo, y comprobaron la capacidad del cwsí para detectar en la planta las variaciones de contenido de agua en el suelo. En India, Kar y Kumar (2010) determinaron el cwsí en diferentes etapas críticas del maíz de invierno, para determinar si la programación de riego basado en la fenología puede optimizarse con el índice. En China, Li *et al.* (2010) estudiaron la utilidad del cwsí para cuantificar el estrés hídrico en trigo y maíz al compararlo con mediciones de flujos de calor latente y de dióxido de carbono. Payero e Irmak (2006) evaluaron la utilización de líneas base superior e inferior dinámicas, para calcular el cwsí en maíz y soya: la línea base inferior (no estrés) se determinó en función del déficit de la altura de la cubierta, presión de vapor del aire, radiación solar y velocidad del viento, y el límite superior (máximo estrés) en función de la radiación solar y la velocidad del viento. El autor cita que las nuevas líneas base facilitan la aplicación del cwsí como herramienta para programar los riegos.

Con el propósito de obtener una exploración más dinámica del estado hídrico de las plantas (O'Shaughnessy *et al.*, 2012b; Peters and Evett, 2008), en estudios recientes se han utilizado sistemas de riego de movimiento lineal o pivote central con radiotermómetros para realizar mediciones de temperatura del follaje. También se han utilizado cámaras infrarrojas de imagen térmica montadas en vehículos aéreos no tripulados (UAV) para cuantificar el estrés hídrico (Bellvert *et al.*, 2013), lo mismo que para detectar los cambios fisiológicos provocados en un olivar por *Verticilium* (Calderón *et al.*, 2013).

Esta técnica para detectar el estrés hídrico y programar riego ha sido poco investigada en México (Lopez *et al.*, 2009). En nuestro país también se está promoviendo la utilización de vehículos no tripulados para la detección de estrés y el estado fisiológico de las plantas. Por lo anterior, es importante efectuar estudios de campo que permitan determinar la relación del índice con variables fisiológicas del cultivo bajo diferentes niveles de estrés hídrico. En este contexto, el interés de esta investigación fue utilizar el cwsí para monitorear el riego en el cultivo de maíz y determinar su respuesta a diferentes niveles de estrés hídrico, con la finalidad de disponer de una técnica que sea segura, confiable y que pueda escalarse a mayores superficies.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se ubicó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México, cuyas coordenadas geográficas son: 25°21'14" N, 101°02'08" O, a una altitud de 1743 msnm.

Tratamientos a evaluar

Se evaluó la aplicación del riego en cinco niveles predeterminados del cwsI (Cuadro 1) en las etapas vegetativa y reproductiva, que cubrieran un rango de menor estrés (cwsI = 0.25) a mayor estrés (cwsI = 0.70). El índice se obtuvo con la siguiente ecuación (Idso *et al.*, 1981; Jackson *et al.*, 1981):

$$CWSI = \frac{(T_h - T_a)_{Li} - (T_h - T_a)_x}{(T_h - T_a)_{Li} - (T_h - T_a)_{Ls}} \quad (1)$$

Donde:

CWSI= Índice de estrés hídrico del cultivo

T_h = Temperatura de las hojas o dosel (°C)

T_a = Temperatura del aire (°C)

$(T_h - T_a)_{Li}$ = Límite inferior de no estrés hídrico (°C)

$(T_h - T_a)_{Ls}$ = Límite superior de máximo estrés hídrico (°C)

$(T_h - T_a)_x$ = Diferencia de temperatura medida diariamente (°C)

El valor diario del $(T_h - T_a)_{Li}$ se calculó con la ecuación de regresión que obtuvieron experimentalmente Idso *et al.* (1981), y que han utilizado De Jonge *et al.* (2015):

$$(T_h - T_a)_{Li} = a - b \text{ DPV}$$

En la Figura 1 se muestra $(T_h - T_a)$ en función del DPV.

Donde:

a = Intercepción (3.11) de relación lineal que ha sido obtenida previamente para el maíz

b = Pendiente (-1.9) de relación lineal que ha sido obtenida previamente

DPV = déficit de presión de vapor de agua (KPa) =

$$DPV = (e^{\circ}_{\text{aire}} - e_{\text{aire}})$$

e°_{aire} = Presión del vapor de agua a saturación (KPa)

e_{aire} = Presión parcial del vapor de agua (KPa)

El valor de $(T_h - T_a)_{Ls}$ se calcula para el valor de temperatura del aire al momento de la medición, de acuerdo al procedimiento recomendado por Idso *et al.* (1981), cuando se obtiene la siguiente igualdad:

$$GPV = DPV$$

Donde:

GPV = gradiente de presión de vapor entre hoja y el aire = $GPV = (e^{\circ}_{\text{hoja}} - e^{\circ}_{\text{aire}})$

e°_{hoja} = presión de vapor a saturación en la hoja (estomas) (KPa)

Cuadro 1. Valores de CWSI programados para efectuar los riegos en dos etapas de desarrollo en el cultivo de maíz variedad ASGROW 7573.

	Etapas	
	Vegetativa	Reproductiva
Tratamiento	CWSI	CWSI
T1	0.25	0.25
T2	0.50	0.35
T3	0.50	0.50
T4	0.70	0.60
T5	0.70	0.70

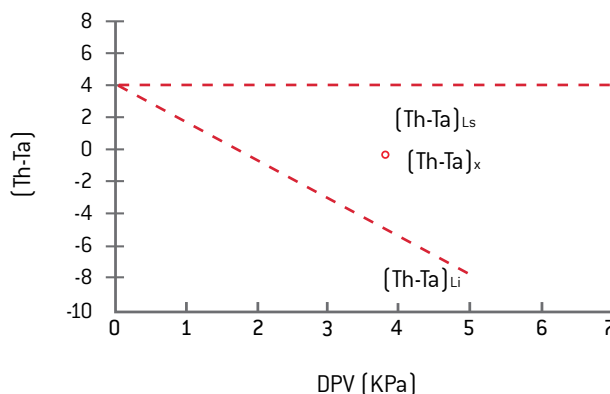


Figura 1. Límite superior e inferior del CWSI.

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Cada tratamiento se estableció en una parcela con dimensión 9.6 * 30 m, cada parcela fue dividida en cuatro repeticiones de 9.6 * 7.5 m. El 17 de junio de 2016 se sembró la variedad ASGROW 7573, con una separación entre surcos de 0.8 m y de 0.2 m entre plantas, y una densidad de población de 62,500 plantas/ha. Previo a la siembra se preparó el terreno con un barbecho y un rastreo, y se aplicó un riego el 11 de junio.

Las mediciones de la temperatura de la hoja (hojas o dosel) se iniciaron a partir de los 35 DDS, entre las 12:00 y 13:00 horas local, periodo del día en que se detectan las mayores diferencias del índice debido al estrés hídrico (Taghvaeian *et al.*, 2012). Inicialmente la medición se efectuó en plantas individuales debido a que en esta etapa el cultivo no tenía cobertura completa, para lo cual se utilizó un termómetro infrarrojo manual (marca EXTECH Instruments). Se hicieron 16 mediciones por parcela (dos mediciones por repetición), visando las plantas del centro de la parcela. La temperatura del aire y humedad relativa se midieron al mismo tiempo con un hidro-termómetro digital (modelo EA25), y los valores obtenidos se utilizaron para calcular el DPV. Cuando la planta tenía 60 DDS, las mediciones de temperatura de la hoja se realizaron con un termómetro infrarrojo Apogee (modelo MI-230). El sensor se colocó a un metro sobre el dosel, a un ángulo de 45° para visar únicamente las hojas del centro de la parcela, y la emisividad del sensor fue de 0.95 (Zia *et al.*, 2011), con un error de medición de $\pm 0.4^{\circ}$ C. El tiempo de medición de todos los tratamientos fue de 20 minutos.

Se realizaron muestreos a una profundidad de 0–80 cm (estratos de 20 cm), para determinar el contenido de agua por el método gravimétrico. El agua aplicada en cada riego fue la necesaria para llevar a capacidad de campo el perfil de profundidad. El requerimiento de riego se calculó con la siguiente ecuación:

$$Lr = \frac{(\theta_{vcc} - \theta_{ux})}{100} \times prf. \quad (2)$$

Donde:

Lr = lámina de riego (cm)

θ_{vcc} = contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v)

θ_{ux} = contenido de humedad en el día de muestreo x (% v/v)

prf. = profundidad del suelo (cm)

Antes del cultivo, se obtuvieron muestras de suelo por estratos de 20 hasta 80 cm de profundidad para el análisis físico-químico de las muestras en el Laboratorio de Aguas Residuales del Departamento de Riego y Drenaje de la UAAAN (Cuadro 2).

Cuadro 2. Propiedades físico-químicas del suelo.

	Estrato del suelo [cm]			
	0-20	20-40	40-60	60-80
Ph	8.04	8.06	8.17	7.99
C.E. [Ds/m]	1.26	1.39	1.33	1.09
Materia orgánica [%]	2.11	2.01	1.58	1.82
Nitrógeno [%]	0.1	0.09	0.08	0.09
Fósforo [%]	53.8	54.3	43.2	38.2
Potasio [%]	611	333	201.6	208.3
Carbonatos totales [%]	54.8	54.8	54.4	53.9
Arcilla [%]	30.2	31.4	31.7	32.9
Limo [%]	21.7	19.7	20.6	21.0
Arena [%]	48	48.8	47.6	46.1
CC [% v/v]	27.6	26.8	25.7	24.9
PMP [% v/v]	15.4	14.8	14.0	13.4

Los riegos se suministraron mediante un sistema de riego por aspersión, a una velocidad de precipitación promedio (V_p) de 1 cm/hora. La dosis de fertilización fue de 253-44-33 (N - P - K en Kg ha⁻¹). Antes del riego de presembrado se aplicó una dosis de 54 - 44 - 22, a los 41 DDS de 132 - 0 - 11 y a los 66 DDS de 67 - 0 - 0.

Las variables que se evaluaron para detectar el efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento del cultivo fueron: el IAF, la MST, el RG y los CRG.

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron nueve muestreos de plantas, en los que se cosecharon 16 plantas por tratamiento (cuatro por repetición). En el laboratorio se separaron hoja y tallo. El área de las hojas se determinó siguiendo el procedimiento recomendado por Tanaka y Yamaguchi (1984): se midió el largo y ancho de las hojas y su producto, que se multiplicó por el factor de corrección 0.75, para después calcular el IAF. Posteriormente, para obtener el peso seco y calcular el rendimiento en kg ha⁻¹, las hojas y tallos, se colocaron en una estufa de secado, a una temperatura de 65° C durante 96 horas.

Para obtener RG y CRG, se cosecharon 40 plantas por repetición (la parcela útil fue de 25.6 m²). Las mazorcas se secaron por 15 días en un área protegida de la lluvia con techo transparente, se desgranaron y se pesó el grano. A continuación se tomó una muestra de cinco mazorcas por repetición, se contabilizó el número de granos por mazorca, luego se tomó una submuestra de 100 granos para determinar el peso seco de grano y corregir a peso seco el grano de la repetición, para posteriormente calcular el rendimiento en ton ha⁻¹.

Para la evaluación de las variables se utilizó un diseño estadístico de bloques completamente al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, y se realizó la prueba de comparación de medias Tukey $P < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la aplicación del riego en cinco niveles pre-determinados del cwsI, en las etapas vegetativa y re-productiva, que cubrieran un rango de menor a mayor estrés hídrico. En la etapa vegetativa, durante el periodo del inicio de las mediciones de los 35 DDS al día 50 DDS, el tratamiento T1 recibió dos riegos y los otros cuatro tratamientos sólo uno (Figura 1); el contenido de humedad en el suelo (CHS) antes de cada riego fue de: T1= 22.02% y 20.90%, T2= 22.48%, T3= 21.02%, T4= 21.18%, T5= 18.29%, que corresponden

a los valores de humedad disponible antes del riego entre un 60% y 40%, como se muestra en la Figura 2. Los índices en el periodo de 60 a 110 DDS (de la fase V a R2), fluctuaron de 0 a 0.10 en todos los tratamientos, lo cual se debió a que en este periodo hubo precipitaciones de 200.4 mm, lo que mantuvo el contenido de humedad alto en el suelo, en todos los tratamientos (Figura 2), y propició que la planta se desarrollara en condiciones óptimas de no estrés hídrico. En el periodo de 110 a 145 (de la fase R2 a R5), el valor del índice se incrementó en los tratamientos debido al efecto combinado de demanda hídrica de la atmósfera y el déficit progresivo de agua en el suelo.

El T1 recibió dos riegos y los otros cuatro tratamientos sólo uno (Figura 1); el contenido de humedad en el suelo antes de cada riego fue de: T1= 24.2% y 18.8%, T2= 18.5%, T3= 17.5%, T4= 16.9%, T5= 15.9%; los valores de HDS antes del riego fluctuaron de 80% en T1 a 10% en T5 (Figura 2); los tratamientos más estresados alcanzaron valores cercanos a PMP.

Agam *et al.* (2013) mencionan que la cobertura de nubes reduce instantáneamente la radicación neta y la energía disponible, lo que altera el balance energético de la superficie, en tanto que la radiación de onda corta disminuye y altera la temperatura de la copa de la planta. De Jonge *et al.* (2015) mencionan que, bajo estrés hídrico, en un día soleado, ventoso y seco, los cultivos se marchitan y el cwsI estaría bien representado. Maes *et al.* (2012) señalan que la temperatura de la hoja está influenciada por la altura y estructura del dosel.

Los datos utilizados de CHS representan la condición de contenido de agua en el suelo en la zona de raíz (80 cm), en una superficie a campo abierto. Los resultados obtenidos en este estudio muestran una relación negativa entre las variables cwsI y CHS, a medida que el agua en la zona de la raíz del cultivo se fue agotando, el cwsI incrementó, como se muestra en la Figura 4. Las condiciones meteorológicas, como también las características de cultivo, juegan un papel muy importante al momento de comparar cwsI VS CHS. Taghvaeian *et al.* (2012) encontraron buena correlación entre estas dos variables, y citan que una buena relación entre estas dos variables puede utilizarse para determinar la cantidad de agua de riego que necesita aplicarse a un valor de cwsI.

En la Figura 4 se muestra el IAF de los tratamientos evaluados. El mayor promedio del IAF se obtuvo en floración: T1= 5.9, T2= 5.3, T3= 5, T4= 4.4 y T5= 4.1. Si bien hubo diferencias numéricas estadís-

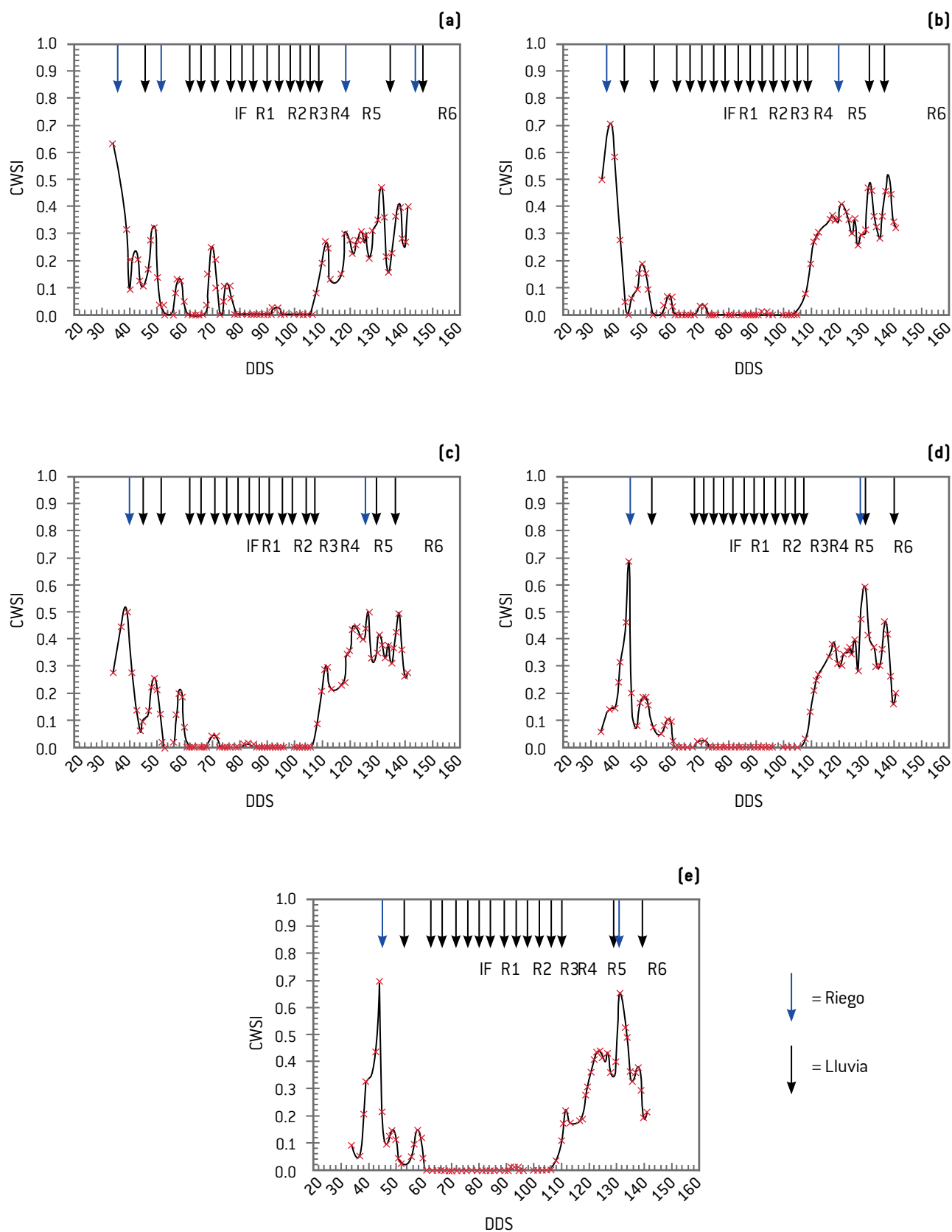


Figura 2. Evolución del CWSI durante el ciclo del cultivo en los tratamientos, T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).

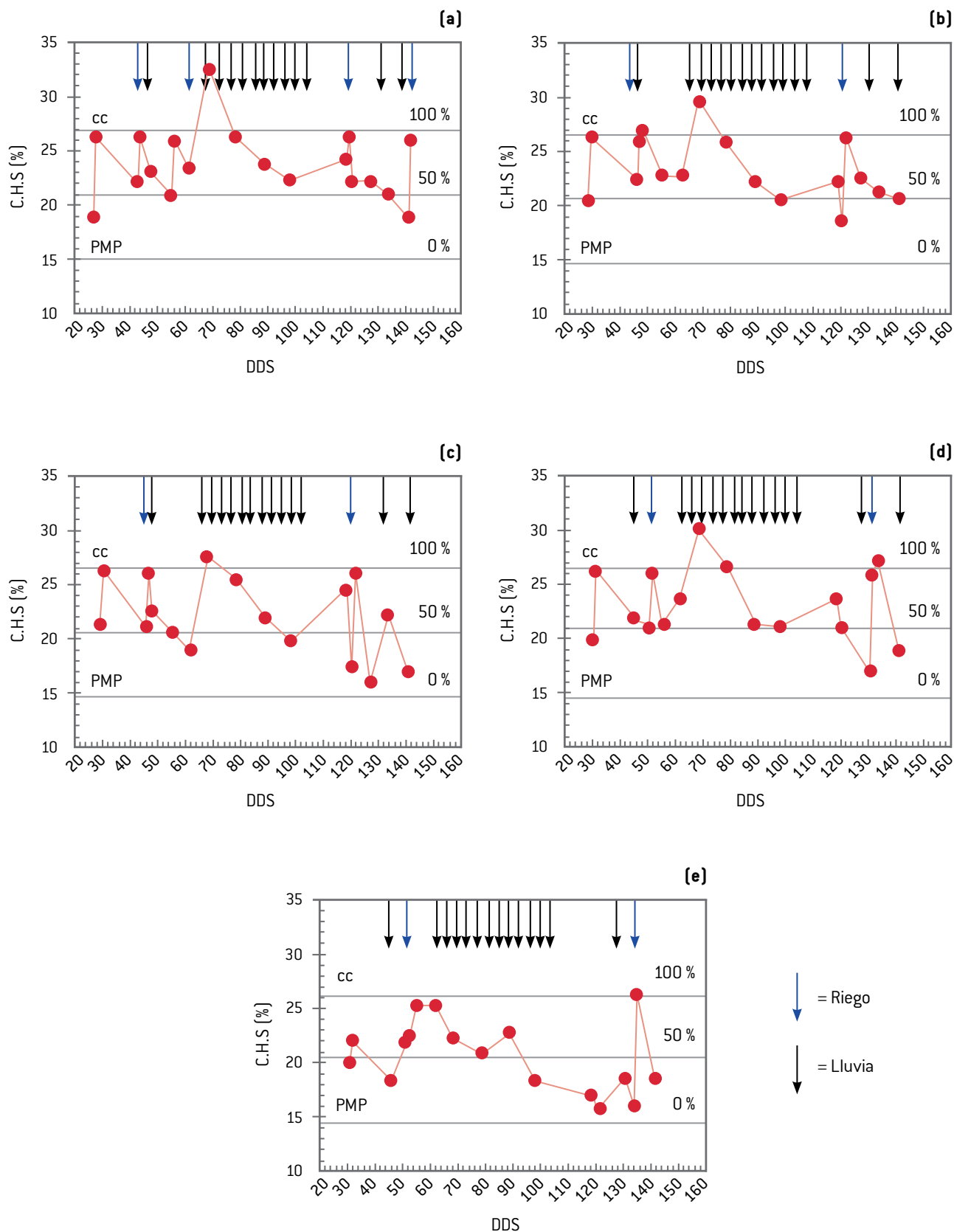


Figura 3. Contenido de humedad en el suelo [CHS] durante del ciclo del cultivo en los tratamientos, T1 (a); T2 (b); T3 (c); T4 (d) y T5 (e).

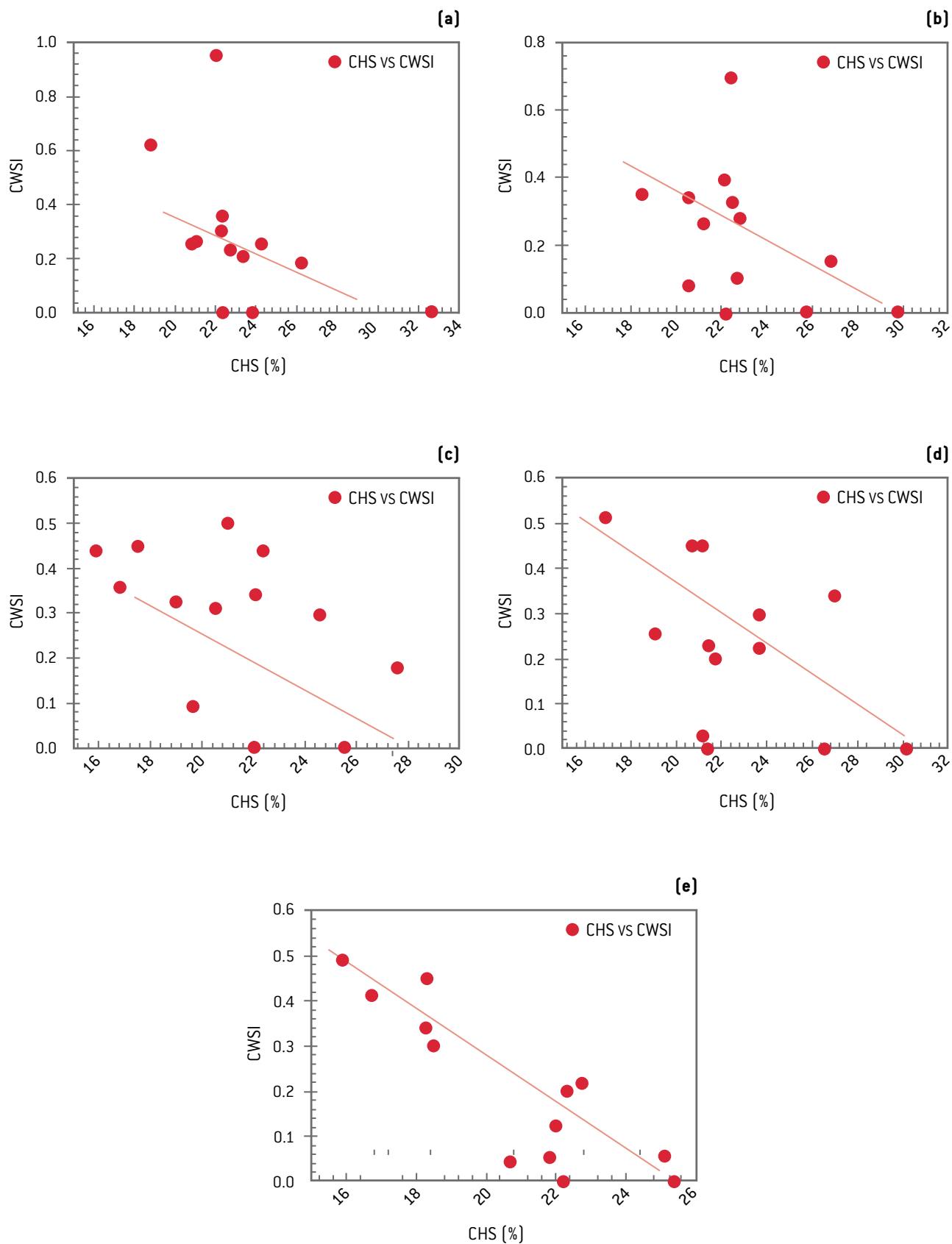


Figura 4. Evolución del CWSI en los diferentes tratamientos en relación con el CHS [% v/v].

ticamente, los tratamientos fueron iguales, lo que se puede atribuir a que durante la etapa vegetativa las plantas se encontraban en óptimas condiciones de humedad debido a los eventos de precipitación que ocurrieron en esta etapa. Los IAF medidos en esta investigación fueron similares a los reportados por Farré *et al.* (2009) y Bouazzama *et al.* (2012), quienes reportan a la floración de maíz un valor máximo de 5.8 y 4.8, respectivamente, para el tratamiento en condición óptima de manejo de agua.

La producción de MST en los diferentes tratamientos fue de: T1= 26,815 Kg ha⁻¹, T2= 23,548 Kg ha⁻¹, T3= 19635 Kg ha⁻¹, T4= 22048 Kg ha⁻¹, T5= 23236 Kg ha⁻¹. La mayor producción se presentó en el T1 y la menor en el T3, como se muestra en la Figura 5. En esta investigación no se encontraron diferencias de MST debido a las intensas lluvias presentadas en etapa vegetativa del cultivo. Los valores de MST obtenidos en esta investigación fueron similares a los reportados por Gheysari *et al.* (2017) y Farré *et al.* (2009), que en condiciones óptimas de manejo obtuvieron 26.8 ton Ha⁻¹ y 23.97 tha⁻¹, respectivamente.

Como se citó anteriormente, los tratamientos se diferenciaron durante la etapa reproductiva, de la fase R2 a R5. Los tratamientos T1 y T2, que estuvieron en condiciones óptimas de manejo de agua: cwsI = 0.25 y 0.35 en esta etapa, obtuvieron el mayor peso en 100 granos: 37.9 g y 37.6 g, y el mayor rendimiento: 11,596 kg ha⁻¹ y 11,239 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Los tratamientos T3, T4 y T5, que tuvieron un mayor estrés hídrico en esta etapa: cwsI = 0.5, 0.6 y 0.7, respectivamente, debido a la sensibilidad del maíz al estrés, tuvieron reducción en el peso de 100 granos: T1= 34.3 g; T2= 35.9 g y T3= 34.3 g, que influyó en un menor rendimiento de grano: T1= 9,062 kg ha⁻¹; T2= 9,842 kg ha⁻¹ y T3 = 9,842 kg ha⁻¹ (Cuadro 3). Ayana (2011) e Igbadun *et al.* (2007) reportaron que el efecto del estrés hídrico en la etapa de floración o reproducción afecta severamente el rendimiento comparado con el estrés en la fase vegetativa de la planta. Irmak y Bastug (2000), en un clima semiárido mediterráneo, evaluaron el efecto de diferente disponibilidad de agua en el suelo en un cultivo de maíz var. Antbey y otros encontraron que el valor medio de cwsI de 0.22 antes de los

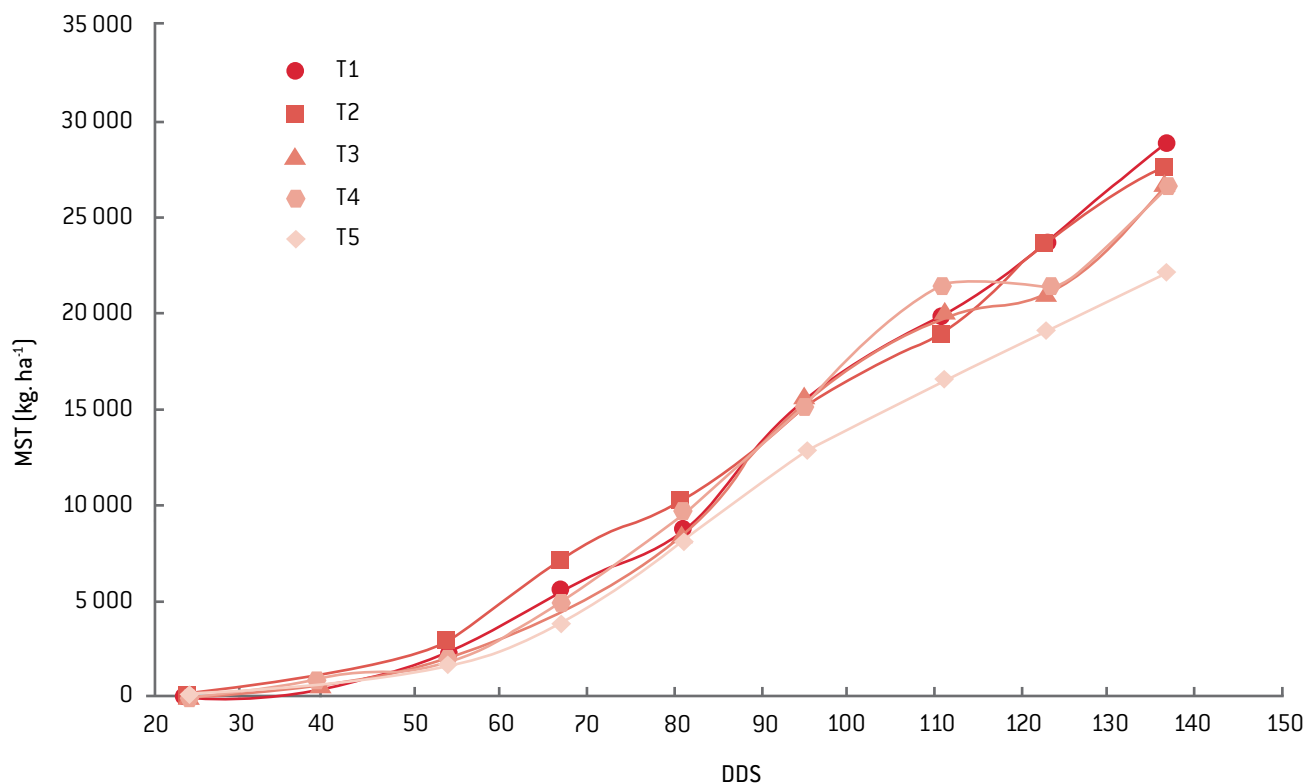


Figura 5. Evolución en el tiempo de materia seca total.

riegos corresponde al mayor rendimiento del grano (6,058 kg ha⁻¹). Por otra parte, Kar y Kumar (2010) consideran que para el maíz en un clima subhúmedo-subtropical de la India, el cwsí que se recomienda para obtener un rendimiento óptimo de maíz es de 0.4 en la etapa de floración y 0.6 en las otras etapas.

La relación entre cwsí y el rendimiento de grano fue básicamente lineal, como se muestra en la Figura 6. Orta *et al.* (2003) e Irmak y Bastung (2000) mencionan que el rendimiento se correlaciona directamente con los valores del cwsí y se puede usar para la predicción de rendimientos.

Cuadro 3. Comparación de medias del peso de 100 granos y rendimiento de grano en los tratamientos.

	Peso de 100 granos (g)	Rendimiento de grano (kg/ha)
T1	37.96a	11596.3a
T2	37.68a	11239.6a
T3	34.38b	9062.7b
T4	35.94ab	9842.3ab
T5	34.34b	9764.5ab
C.V	3.04	9.12

Valores con la misma letra son iguales entre sí (Tukey P<0.05), CV: coeficiente de variación en %.

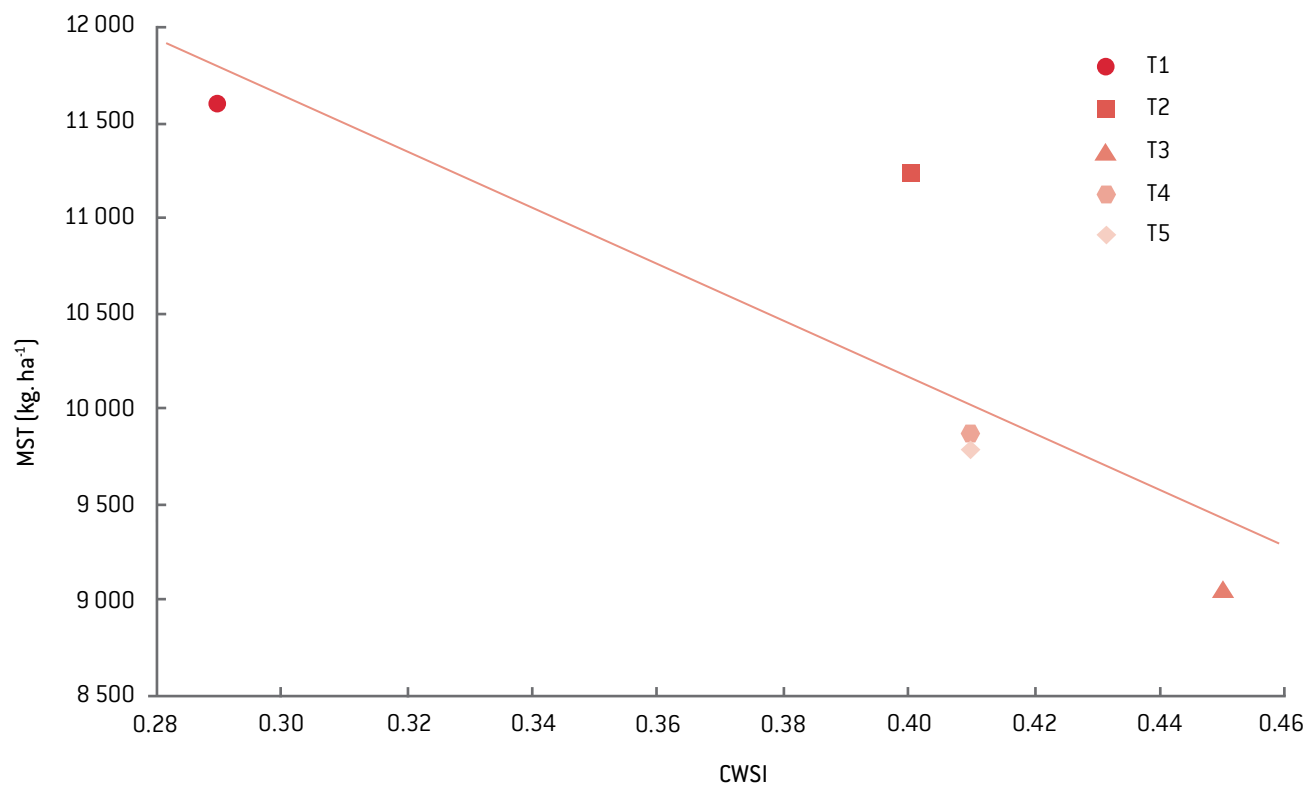


Figura 6. Rendimiento de grano de maíz en función del valor medio de CWSI en la etapa reproductiva.

CONCLUSIÓN

Los resultados mostraron que el CWSI es una técnica eficiente para monitorear y cuantificar estrés hídrico en el maíz, ya que responde a la disponibilidad de agua en el suelo, a los eventos de riego y a las condiciones climáticas. Se determinaron relaciones entre CWSI, el contenido de agua en el suelo y rendimiento de grano. Con base en estos resultados, un CWSI de 0.25 en etapa vegetativa y reproductiva antes del riego producirá el máximo crecimiento vegetativo y rendimiento de grano. La termometría infrarroja, un método que no es destructivo, es potencialmente prometedor para detectar estrés hídrico en maíz, ya que puede monitorear el estado hídrico de un cultivo en una mayor superficie que los métodos tradicionales.

LITERATURA CITADA

- AGAM, N., Cohen, Y., Alchanatis V., Ben-Gal A. (2013). How sensitive is the CWSI to changes in solar radiation? *International journal of remote sensing* 34(17): 6109-6120.
- ALDERFASI, A. A., Nielsen D.C. (2001). Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management* 47: 69-75.
- AYANA, M. (2011). Deficit irrigation practices as alternative means of improving water use efficiencies in irrigated agriculture: Case study of maize crop at Arba Minch, Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 6: 226-235.
- BELLVERT, J., Zarco-Tejada P. J., Girona J., Fereres E. (2014). Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15: 361-376.
- BOUAZZAMA, B., Xanthoulis D., Bouaziz A., Ruelle P. Mailhol J.C. (2012). Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in semi-arid climate of Tadla (Morocco). *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement*, 16: 468.
- CALDERÓN, R., Navas-Cortes, J.A., Lucena, C., Zarco-Tejada, P.J. (2013). High resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*. 139: 231-245.
- CREMONA, M.V., Stützel H., Kage H. (2004). Irrigation Scheduling of Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *Gongylodes*) Using Crop Water Stress Index. *Hort Science*. 39: 276-279.
- CHEN, J., Lin L., Lü G. (2010). An index of soil drought intensity and degree: an application on corn and a comparison with CWSI. *Agricultural Water Management*. 97: 865-871.
- DE JONGE, K. C., Taghvaeian S., Trout T. J., Comas L.H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*. 156: 51-62.
- ERDEM, Y., Arin L., Erdem T., Polat S., Deveci M., Okursoy H., Gültas H. (2010). Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*). *Agricultural Water Management*. 98: 148-156.
- ERDEM, Y., Sehirali S., Erdem T., Kenar D. (2006a). Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turk.J. Agric. Forest*. 30: 195-202.
- ERDEM, Y., Erdem T., Orta A.H., Okursoy H. (2006b). Canopy-air temperature differential for potato under different irrigation regimes. *Acta Agric. Scand*. 56: 206-216.
- FARRÉ, I., Faci J.M. (2009). Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 96: 383-394.
- GHEYSARI, M., Sadeghi S. H., Loescher H.W., Amiri S., Zareian M. J., Majidi M. M., Payero J.O. (2017). Comparison of deficit irrigation management strategies on root, plant growth and biomass productivity of silage maize. *Agricultural Water Management* 182: 126-138.
- IDSO, S.B. (1982). Now Water Stressed Baselines a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27: 59-70.
- 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.
- IRMAK, S., Haman D. Z., Bastug R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal* 92: 1221-1227.
- IGBADUN, H.E., Tarimo A.K. Salim B. A. Mahoo H.F. (2007). Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. *Agricultural Water Management* 94: 1-10.
- 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: 1133-1138.
- KAR, G., Kumar A. (2010). Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. *Irrigation Science*, 28: 211-220.

- LI, L., Nielsen D.C., Yu Q., Ma L., Ahuja L.R. (2010). Evaluating the crop water stress index and its correlation with latent heat and CO₂ fluxes over winter wheat and maize in the north China plain. *Agricultural Water Management* 97: 1146–1155.
- LÓPEZ-LÓPEZ, R., Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M. A., López-Cruz I. L., Sánchez-Cohen I., Ruiz-García A. (2009) Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15: 259–267.
- MAES, W. H., Steppe K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany* 63: 4671–4712.
- NAYAK, S.S. (2005). Thermal imagery and spectral reflectance based system to monitor crop condition. Mechanical Engineering Department, Texas Tech University, Lubbock, TX
- O'SHAUGHNESSY, S.A., Evett S.R., Colaizzi P.D., Howell T.A. (2012). Grain sorghum response to irrigation scheduling with the time-temperature threshold method and deficit irrigation levels. *Transaction ASABE* 55: 451–461.
- ORTA, A.H., Erdem T., Erdem Y. (2002). Determination of water stress index in sun-flower. *Helia* 37: 27–38.
- PAYERO, J.O., Irmak S. (2006). Variable upper and lower crop water stress index base-lines for corn and soybean. *Irrigation Science* 25: 21–32.
- PLAYAN, E., Salvador R., López C., Lecina S., Dechmi F., Zapata N. (2014). Solid-set sprinkler irrigation controllers driven by simulation models: opportunities and bottle necks. *J. Irrig. Drain. E* 140: 04013001.
- PETERS, R.T., Evett S.R. (2008). Automation of a center pivot using the temperature-time-threshold method of irrigation scheduling. *Journal Irrigation Drainage Engineering* 134: 286–291.
- SEZEN, S.M., Yazar A., Yıldız D., Yucel S., Akildiz A., Tekin S., Akhoundnejad Y. (2014). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. *Agricultural Water Management* 143: 115–131.
- TAGHVAEIAN, S., Chávez J.L. y Hansen N.C. (2012). Infra-red thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado. *Remote Sensing* 4: 3619–3637.
- TANAKA, A. y Yamaguchi J. (1984). Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano de maíz. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. Chapingo México. 120 p.
- ZIA, S., Spohrer K., Wenyong D., Spreer W., Romano G. y Xiongkui H. (2011). Monitoring physiological responses to water stress in two maize varieties by infrared thermography. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 4(3): 7–15.