

PRODUCTIVIDAD DEL AGUA NORMALIZADA PARA EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays*) EN CHAPINGO, MÉXICO

NORMALIZED WATER PRODUCTIVITY FOR MAIZE CULTIVATION (*Zea mays*) IN CHAPINGO, MEXICO

Misael López-Hernández, Ramón Arteaga-Ramírez*, Agustín Ruiz-García,
Mario Alberto Vázquez-Peña, Jesús Isaac López-Rosano

Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México (arteagarr@gmail.com)

RESUMEN

El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, para satisfacer las necesidades actuales y de las generaciones futuras, es un reto actual. El aprovechamiento de las energías renovables y el uso eficiente del agua cada vez es más relevante para la sociedad. El agua es el insumo principal en la mayoría de los procesos industriales y el desarrollo de las poblaciones, también el detonante de la germinación de las semillas de plantas. El uso eficiente del agua en la producción agrícola es un paso hacia su aprovechamiento. El objetivo del presente estudio fue determinar la productividad del agua normalizada para el cultivo de maíz (*Zea mays*) con datos experimentales. El valor máximo de productividad del agua se obtiene al aplicar lámina de riego equivalente a 100% de la evapotranspiración de referencia (ET_0). El estudio se realizó con maíz, cuatro tratamientos de riego complementario: 60, 80, 100 y 120 % ET_0 , y de secano y en bloques al azar, con tres repeticiones para cada tratamiento. La productividad del agua normalizada (WP*) se determinó con regresión lineal, por el origen, de la biomasa ($kg\ m^{-2}$) y la transpiración acumulada normalizada por la evapotranspiración de referencia. La productividad del agua normalizada para 100 % ET_0 fue $23.30\ g\ m^{-2}$. El rendimiento del maíz incrementa al utilizar eficientemente el agua para riego de auxilio.

Palabras clave: *Zea mays*, productividad del agua normalizada, transpiración, lámina de riego, profundidad de riego.

INTRODUCCIÓN

Los rendimientos bajos y los precios volátiles del maíz (*Zea mays*) en México son las razones principales de que la superficie para

ABSTRACT

The sustainable use of natural resources to satisfy the needs of current and future generations is an ongoing challenge. The use of renewable energies and the efficient use of water is becoming more and more relevant to society. Water is the main input in most industrial processes and the development of populations, as well as initiating germination in plant seeds. The efficient use of water in agricultural production is a step towards a better water management. The aim of the present study was to determine the normalized water productivity for the planting of maize (*Zea mays*) with experimental data. The highest value of water productivity is obtained when applying irrigation in a water table level 100% equal to the reference evapotranspiration (ET_0) value. The study was carried out using maize with four supplementary irrigation treatments: 60, 80, 100 and 120% ET_0 , and rainfed and in random blocks, with three replications per treatments. The normalized water productivity was determined using linear regression by the origin, between biomass ($kg\ m^{-2}$) and accumulated transpiration, normalized by the reference evapotranspiration. The normalized water productivity for 100% ET_0 was $23.30\ g\ m^{-2}$. Maize yield increases when water is used efficiently for supplementary irrigation.

Key words: *Zea mays*, normalized water productivity, transpiration, water table level, watering depth.

INTRODUCTION

The low yields and the volatile prices of maize (*Zea mays*) in Mexico are the main reasons why the surface for its production has been changed for other, more profitable crops. Mexico is one of the main importers of this grain, although the tendency of its yield has grown, both with and without irrigation. The state of Mexico is one of the main producers of rainfed maize, and with irrigation,

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2018. Aprobado: octubre, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 53: 811-820. 2019.

su producción haya cambiado hacia otros cultivos más rentables para el productor. México es uno de los principales importadores de este grano, aunque la tendencia del rendimiento haya aumentado en seco y con riego. El estado de México es uno de los principales productores de maíz en seco y con riego los rendimientos son menores al promedio nacional (8 Mg ha^{-1}) (FIRA, 2016).

Las estrategias para el uso eficiente del agua son necesarias, por lo que se necesitan alternativas para aumentar la productividad en la agricultura. Los modelos de simulación biológica, como el AquaCrop, modelan el rendimiento de los cultivos de acuerdo al agua disponible para su desarrollo (Steduto *et al.*, 2012). Los modelos de cultivo ayudan a predecir la producción de maíz y tomar decisiones, pero son poco adecuados para gestionar y aliviar los riesgos por eventos climáticos extremos (Jin *et al.*, 2016). Según Vanuytrecht *et al.* (2014), las ecuaciones del modelo AquaCrop y su parametrización implican inevitablemente supuestos y simplificaciones de la realidad, donde el desarrollo del dosel y la fenología son impulsados por la temperatura. El primero determina la cantidad de agua transpirada por el cultivo, la producción de biomasa (acumulada) se obtiene con la suma de la razón diaria de transpiración y la evapotranspiración de referencia (ET_0) durante el período de producción, y la productividad del agua normalizada (WP^*) es el factor proporcional entre la biomasa y la transpiración normalizada por la evapotranspiración de referencia (ecuación 1).

$$B_n = WP^* \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr_i}{ET_0} \right) \quad (1)$$

donde B_n es la producción acumulada de biomasa aérea después de n días (g m^{-2}), Tr_i es la transpiración (mm d^{-1}), ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}) para el i -ésimo día; $i = 1, \dots, n$ son los días secuenciales del período en que se produce la biomasa; WP^* es WP^* (g m^{-2}).

El monitoreo del cultivo a lo largo de su ciclo de vida permite validar el funcionamiento del modelo al representar los procesos que definen el rendimiento de los cultivos. El modelo AquaCrop se usa para simular la producción de biomasa, rendimiento de grano y WP^* , con lo que se determina la gestión del

yields are below the national average (8 Mg ha^{-1}) (FIRA, 2016).

The strategies for the efficient use of water are necessary, therefore alternatives are needed to increase productivity in agriculture. Biological simulation models, such as AquaCrop, simulate crop yields according to the water available for their development (Steduto *et al.*, 2012). Cultivation models help predict maize production and to make decisions, but they are somewhat inadequate to manage and alleviate the risks of extreme weather events (Jin *et al.*, 2016). According to Vanuytrecht *et al.* (2014), the equations of the AquaCrop model and their parameterization inevitably imply assumptions and simplifications of reality, where canopy development and phenology are stimulated by temperature. The former determines the amount of water transpired by the crop; biomass production (accumulated) is obtained with the addition of the daily transpiration ratio and reference evapotranspiration (ET_0) during the production period, and the normalized water productivity (WP^*) is the proportional factor between the biomass and normalized transpiration by the reference evapotranspiration (equation 1).

$$B_n = WP^* \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr_i}{ET_0} \right) \quad (1)$$

where B_n is the accumulated production of aerial biomass after n days (g m^{-2}), Tr_i is the transpiration (mm d^{-1}), ET_0 is the reference evapotranspiration (mm d^{-1}) for the i -th day; $i = 1, \dots, n$ are the sequential days of the period in which the biomass is produced; WP^* is WP^* (g m^{-2}).

Monitoring the crop throughout its life cycle helps validate the functioning of the model by representing the processes that define the yield of the crops. The AquaCrop model is used to simulate biomass production, grain yield and WP^* , which helps determining the irrigation water management and other strategies related to weather type and planting dates in different soil classes (Araya *et al.*, 2016).

The model was validated on the prediction of yield and biomass. Greaves and Wang (2016) evaluated the development of the canopy and water efficiency. This model is reliable for the simulations of biomass,

agua de riego y estrategias relacionadas con el tipo de clima y fechas de siembra en los tipos de suelo (Araya *et al.*, 2016).

El modelo se validó en la predicción del rendimiento y la biomasa. Greaves y Wang (2016) evaluaron el desarrollo del dosel y la eficiencia del agua. Este modelo es confiable para las simulaciones de biomasa, rendimiento y demanda de agua, y se recomienda para su aplicación en efectos del clima (Stricevic *et al.*, 2011). La validación del modelo también ha incluido varios cultivos y Guendouz *et al.* (2014) lo validaron para trigo, en el cual la predicción del rendimiento mostró correlación significativa entre los valores medidos y los simulados, aunque con tendencia a subestimar los valores de biomasa y cobertura vegetal. Farahani *et al.* (2009) parametrizaron el modelo para el cultivo de algodón y obtuvieron simulación precisa del rendimiento, buena de la biomasa y aceptable de la cobertura vegetal. El modelo AquaCrop predijo con precisión la biomasa y rendimiento final de maíz en seco (Mhizha *et al.*, 2014), riego (Salemi *et al.*, 2011) y riego complementario (Stricevic *et al.*, 2011).

El riego, con frecuencia, es complemento de las precipitaciones en la agricultura, para aumentar la productividad de los cultivos (Araya *et al.*, 2016), y diseñar programas de manejo del agua de riego: Al respecto, los modelos de simulación biológica son herramientas para generar información sin el experimento en campo. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar WP* para el cultivo de maíz, para fundamentar el uso del modelo AquaCrop en este cultivo (Steduto *et al.*, 2012). La hipótesis fue que con una lámina de riego del 100% ET₀ se obtiene la productividad máxima del agua en el cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la parcela experimental del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo (19° 30' N y 98° 51' O). El área presenta un clima Cb(Wo)(W)(i') g, templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitación media anual de 664 mm, época seca en invierno y temperatura media anual de 15.5 °C (oscilación térmica de 5 a 7 °C). Mayo es el mes más caluroso y enero el más frío.

Los valores diarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento (a 2 m de altura), radiación solar y precipitación se obtuvieron de la estación meteorológica automática y con-

yield and water demand, and is recommended to be used on climate effects (Stricevic *et al.*, 2011). Model validation has included several crops and Guendouz *et al.* (2014) validated the model for wheat, in which the yield prediction showed a significant correlation between the measured and simulated values, yet with a tendency to underestimate the values for biomass and plant coverage. Farahani *et al.* (2009) parametrized the model for cotton and they obtained an accurate simulation of yield, a good simulation for biomass and an acceptable simulation for plant coverage. The AquaCrop model accurately predicted the biomass and final yield of rainfed maize (Mhizha *et al.*, 2014), irrigated maize (Salemi *et al.*, 2011) and maize with supplementary irrigation (Stricevic *et al.*, 2011).

Irrigation is usually supplementary to the rainfall in agriculture to increase crop productivity (Araya *et al.*, 2016) and designing irrigation water management programs. Regarding this, biological simulation models are tools to generate information without the field experiment. Therefore, the aim of the present study was to determine WP* for maize, in order to substantiate the AquaCrop model use for this staple (Steduto *et al.*, 2012). The hypothesis was that with one water table level of 100% ET₀, it is obtained the highest water productivity in maize.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in the experimental plot of the Department of Irrigation of the Chapingo Autonomous University (19° 30' N and 98° 51' W). The area has the Cb(Wo)(W)(i') g climate, warm and sub-humid with summer rainfall, an average annual rainfall of 664 mm, dry in the winter, and the average annual temperature of 15.5 °C (thermal oscillation between 5 and 7 °C). May is the hottest month and January is the coldest.

The daily values for temperature, relative humidity, wind speed (at a height of 2 m), solar radiation and rainfall were taken from the automatic and conventional weather station of the Chapingo Autonomous University. During the sampling for biomass and plant coverage evaluation, the effective rainfall was 292.3 mm and the ET₀, estimated with the FAO Penman-Montieth method, was 508.9 mm (Allen *et al.*, 2006).

During the first 75 to 80 d, when the vegetative stage of the crop occurred, no irrigation was required because rainfall distribution was adequate. In the stage of flowering and filling of the grains, there was no rain, and thus the supplementary water

vencional de la Universidad Autónoma Chapingo. Durante los muestreos de biomasa y evaluación de cobertura vegetal, la precipitación efectiva fue 292.3 mm y ET_0 , estimada por el método de FAO Penman-Montieth, fue 508.9 mm (Allen *et al.*, 2006).

Durante los primeros 75 a 80 d, que correspondieron a la etapa vegetativa del cultivo, no se requirió riego porque la distribución de la precipitación fue adecuada. En la etapa de floración y llenado de grano hubo sequía, por lo cual se aplicaron las láminas de riego complementario; algunos eventos de lluvia se presentaron, pero no afectaron el desarrollo del estudio. La precipitación y ET_0 , evapotranspiración de referencia se registraron con láminas de 292.3 y 508.9 mm, respectivamente, durante el ciclo del cultivo (Figura 1).

El suelo de la parcela experimental presentó textura franca con pH moderadamente alcalino, libre de carbonatos y otras sales, contenido de materia orgánica moderadamente bajo y concentración pobre de boro. La capacidad de campo (21.3%), el punto de marchitez permanente (12.7%), el punto de saturación del suelo (40%), conductividad hidráulica (4.5 cm h^{-1}) y la densidad aparente (1.03 g cm^{-3}) también se determinaron. El cultivo se mantuvo libre de arvenses, plagas y enfermedades con tratamientos preventivos y de control; el modelo AquaCrop no separa los efectos por estas plagas y enfermedades (Steduto *et al.*, 2012).

El experimento tuvo cinco tratamientos (con tres repeticiones), cuatro con riego complementario a la lluvia y uno en seco, y la muestra fue representativa. La diferencia entre tratamientos fue la lámina de agua de riego aplicada, pero la fertilización y otras prácticas de manejo fueron similares entre tratamientos. Para definir la lámina de riego se utilizó la ET_0 porque es parte de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la afectan los parámetros

table levels were provided; scarce raining events occurred, yet they did not affect the development of the study. Rainfall and ET_0 , reference evapotranspiration, were recorded with depths of 292.3 and 508.9 mm, respectively, during the crop cycle (Figure 1).

The soil of the experimental plot presented a loamy texture with a moderately alkaline pH, free from carbonates and other salts, a moderately low content of organic matter and a poor concentration of boron. Field capacity (21.3%), permanent wilting point (12.7%), soil saturation point (40%), hydraulic conductivity (4.5 cm h^{-1}) and apparent density (1.03 g cm^{-3}) were also determined. Crop field was maintained free of weeds, pests and diseases with prevention and control treatments. AquaCrop model does not discriminate the effects from pests or diseases (Steduto *et al.*, 2012).

The experiment had five treatments (with three replications), four with irrigation, supplementary to rainfall, and one rainfed, and the sample was representative. The difference among treatments was the irrigation water table level supplied, but fertilization and other practices were similar among treatments. In order to define the water table level we used the ET_0 because it is part of the crop's evapotranspiration (ET_c), it is affected by weather parameters and it is not altered by management practices. The four water table levels included a complete irrigation treatment (100% of the ET_0), two with 60 and 80% of ET_0 and one with overabundant irrigation (120% of ET_0). The study included the hybrid Aspros 823 for grain (white maize) and fodder of an intermediate-precocious cycle, suitable for irrigation areas and good amount of rainfall (rainfed); sowing was carried out on June 18, 2016.

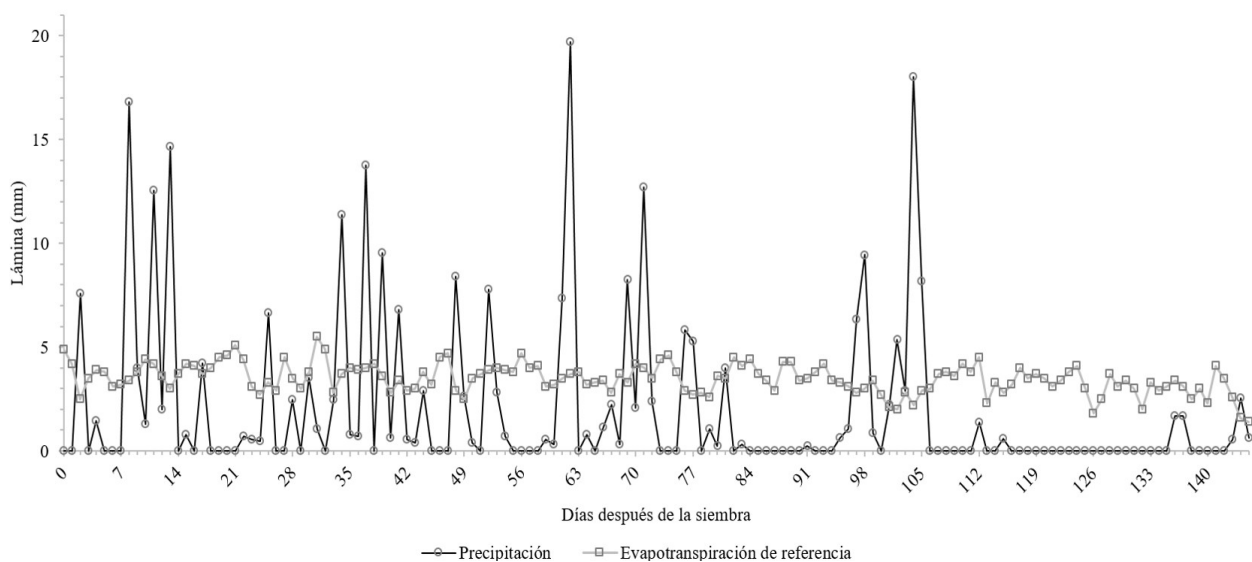


Figura 1. Distribución de la precipitación y evapotranspiración de referencia en la etapa experimental.
Figure 1. Distribution of rainfall and reference evapotranspiration in the experimental stage.

climáticos y no se altera por las prácticas de manejo. Las cuatro láminas de riego incluyeron un tratamiento de riego completo (100% de la ET_0), dos con 60 y 80% de ET_0 y uno con sobre riego (120% de ET_0). El estudio incluyó al híbrido Aspros 823, para grano (maíz blanco) y forraje, de ciclo intermedio-precoc, para zonas de riego y buen temporal (secano); la siembra se realizó el 18 de junio del 2016.

Durante el desarrollo se evaluó la acumulación de biomasa (fresca y seca). Para esto, dos plantas (al azar) se cosecharon por repetición. Hojas, tallo, espiga y mazorca se separaron, pesaron, se deshidrataron en horno para secado (POM-326-F) y pesaron. El peso promedio fresco y seco de cada tratamiento se obtuvo de 15 muestreos.

Steduto y Albrizio (2005) indicaron que la eficiencia del uso del agua del cultivo debe incluirse en los modelos de simulación de cultivos, la define la pendiente de la ganancia de C y la transpiración acumulada del dosel; la ganancia de C es la biomasa sobre el suelo y para minimizar la contribución de la evaporación por el suelo, al consumo de agua, se determina para todos los cultivos cuando el suelo está totalmente cubierto.

WP* se obtiene con la regresión lineal por el origen entre las mediciones de biomasa ($g\ m^{-2}$) en campo y la transpiración acumulada normalizada por la evapotranspiración de referencia, donde la pendiente representa el parámetro (Steduto *et al.*, 2012).

González *et al.* (2010) definieron WP como la cosecha física o económica por unidad de agua consumida por el cultivo ($kg\ m^{-3}$ o $\$ m^{-3}$), donde el numerador es el rendimiento (R) expresado en kg o valor monetario por unidad de superficie ($kg\ ha^{-1}$ o $\$ ha^{-1}$) y el denominador puede ser: la transpiración (tr), evapotranspiración (ET), el agua aplicada en el riego o ella más la lluvia (T), y proponen las ecuaciones 2 y 3 para su evaluación:

$$WP_{Et} = \frac{R}{ET} \quad (2)$$

$$WP_T = \frac{R}{T} \quad (3)$$

donde WP_{Et} es la productividad del agua consumida, y WP_T es la productividad del agua total (agua aplicada en el riego más precipitaciones). Además, se usaron las siguientes definiciones: WP_{tr} la productividad del agua transpirada (ecuación 4) y se propone la ecuación 5, donde WP_{Rj-Ri} es la productividad del agua entre tratamientos de riego:

$$WP_{tr} = \frac{R}{tr} \quad (4)$$

During the development, we evaluated the accumulation of biomass (fresh and dry). Two plants (at random) were harvested per repetition. Leaves, stems, spikes and ears were separated, weighed, dehydrated in the oven for drying (POM-326-F) and weighed. The average fresh- and dry weight of each treatment was obtained from 15 samplings.

Steduto and Albrizio (2005) indicated that the water use efficiency (WUE) of the crop must be included in the planting simulation models; it is defined by the slope of C increase and the accumulated transpiration of the canopy; the C increase is the biomass above the soil and, in order to minimize the contribution of soil evaporation to water consumption, WUE is determined for all crops when the soil is completely covered.

WP* is obtained with the linear regression by the origin between measured biomass ($g\ m^{-2}$) on the field and the accumulated transpiration, normalized by reference evapotranspiration, where the slope represents the parameter (Steduto *et al.*, 2012).

González *et al.* (2010) defined WP as the physical or economic harvest per unit of water consumed by the crop ($kg\ m^{-3}$ o $\$ m^{-3}$), where the numerator is the yield (R) expressed in kg or monetary value per surface unit ($kg\ ha^{-1}$ or $\$ ha^{-1}$) and the denominator can be the transpiration (tr), evapotranspiration (ET), the water applied in irrigation, or this water plus rainfall (T), and they propose for their evaluation, equations 2 and 3:

$$WP_{Et} = \frac{R}{ET} \quad (2)$$

$$WP_T = \frac{R}{T} \quad (3)$$

where WP_{Et} is the productivity of the water consumed and WP_T is the productivity of the total water (supplied by irrigation plus rainfall). In addition, the following definitions were used: WP_{tr} is the productivity of transpired water (equation 4) and we propose equation 5, where WP_{Rj-Ri} is the water productivity among irrigation treatments:

$$WP_{tr} = \frac{R}{tr} \quad (4)$$

$$WP_{Rj-Ri} = \frac{R_j - R_i}{I_j - I_i} \quad (5)$$

where tr represents transpiration (mm); R_j is the yield of the irrigation treatment under evaluation and R_i is the yield of the

$$WP_{R_j-R_i} = \frac{R_j - R_i}{I_j - I_i} \quad (5)$$

donde tr representa la transpiración (mm); R_j es el rendimiento del tratamiento de riego a evaluar y R_i es el rendimiento del tratamiento de riego con el cual se hace la comparación; I_j corresponde a la lámina de agua aplicada del tratamiento de riego a evaluar, y I_i corresponde a la lámina de agua aplicada del tratamiento de riego con el cual se hace la comparación. Para el 60% de ET_0 en el denominador, se usó la lámina aplicada para ese tratamiento y el rendimiento de referencia fue el del tratamiento de secano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el riego complementario con el tratamiento de 100% de ET_0 se puede alcanzar el potencial productivo para el híbrido del estudio, en Chapingo, Texcoco, Estado de México. El rendimiento en secano fue superior a la media nacional (2.3 Mg ha⁻¹) (FIRA, 2016), con 80, 100 y 120% de ET_0 (riego complementario) los rendimientos fueron superiores a la media nacional de maíz (8.0 Mg ha⁻¹) con el régimen de riego. El Distrito de riego de Texcoco tiene potencial de rendimiento para maíz de 2.5 a 4.0 Mg ha⁻¹ para temporal estricto (secano), de 5.5 a 8.0 Mg ha⁻¹ en punta de riego y de 10.0 Mg ha⁻¹ para riego completo (INIFAP, 2017). Esto indica que al aplicar los riegos complementarios puede alcanzarse y en algunos casos superar el rendimiento potencial para la zona de estudio (Cuadro 1).

La zona de trabajo presentó una limitada cantidad de agua por precipitación en la etapa reproductiva durante el desarrollo del experimento, por lo que se realizó un riego al cultivo durante esta etapa. Con

irrigation treatment with which comparison is being made; I_j is the water table level supplied by the irrigation treatment to be evaluated and I_i is the water table level supplied by the irrigation treatment with which the comparison is being made. For 60% of ET_0 in the denominator, we used the water table level supplied in that treatment and the reference yield was the one for the rainfed treatment.

RESULTS AND DISCUSSION

With the supplementary irrigation in the treatment of 100% ET_0 it is possible to reach the productive potential for the hybrid under study in Chapingo, Texcoco, state of Mexico. The yield in the rainfed treatment was higher than the national average (2.3 Mg ha⁻¹) (FIRA, 2016), with 80, 100 y 120% of ET_0 (supplementary irrigation); yields were higher than the national average for maize (8.0 Mg ha⁻¹) under the irrigation regime. The Texcoco Irrigation District has a yield potential for maize of 2.5 to 4.0 Mg ha⁻¹ for non-irrigation, from 5.5 to 8.0 Mg ha⁻¹ under single early establishment irrigation and 10.0 Mg ha⁻¹ for full irrigation (INIFAP, 2017). This indicates that applying supplementary irrigation can help reaching, and in some cases surpassing the potential yield for the area under study (Table 1).

The work area presented a limited amount of precipitation (rainfall) in the reproductive stage during the experiment, therefore the crop was irrigated in that stage. With a water table level of 60% of ET_0 the increase was of 2.21 Mg ha⁻¹ in comparison to the rainfed crop. Stress during the filling of the grains was evident when comparing all treatments. There was a negative effect in plant coverage (Figure 2), which leads to a reduction in the biomass production of and in total yield at harvest.

The depth of 60% of ET_0 may be the best option in treatments under stress, since it has the highest values for total water productivity (WP_T) and transpired water (WP_{tr}) to obtain a higher productivity. When considering irrigation plus rain (WP_{tr}), it was reached with the treatment of 100% of ET_0 . Alvarez *et al.* (2016) acknowledged that, when irrigating, farmers can secure an optimum harvest every year, regardless of rainfall, and the maximum water productivity among irrigation treatments ($WP_{(R_j-R_i)}$) reaches 100% of ET_0 . The productivity of water consumed (WP_{Et}) obtained was between 10.36 and 24 kg ha⁻¹ mm⁻¹, and the total water

Cuadro 1. Rendimientos de maíz obtenidos con tratamientos ET_0 .

Table 1. Maize yields obtained with ET_0 treatments.

Tratamiento (% de ET_0)	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)
Secano	5.26
60	7.47
80	8.87
100	13.06
120	13.19

ET_0 : Evapotranspiración de referencia ♦ ET_0 : Reference evapotranspiration.

lámina de riego de 60% de ET_0 el aumento fue 2.21 $Mg\ ha^{-1}$ en comparación al cultivo en secano; el estrés en la etapa de llenado de grano fue evidente al comparar todos los tratamientos. En la cobertura vegetal hubo un efecto negativo (Figura 2), lo cual repercute también en una disminución de la producción de biomasa y del rendimiento final.

La lámina del 60% de ET_0 sería la mejor opción en los tratamientos con estrés porque tiene los valores más altos de productividad del agua total (WP_T) y de agua transpirada (WP_{tr}) para obtener la productividad mayor. Al considerar riego más lluvia (WP_T) se alcanzó con el tratamiento 100% de ET_0 . Alvarez *et al.* (2016) reconocieron que, al aplicar riego, el agricultor asegura cada año una cosecha óptima independiente de la ocurrencia de precipitaciones, y se observa que la productividad máxima del agua entre tratamientos de riego ($WP_{(Rj-Ri)}$) se alcanza al aplicar el 100% de ET_0 . La productividad del agua consumida (WP_{Et}) obtenida fue 10.36 a 24 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$, y la productividad del agua total (WP_T) varió de 18.19 a 22.55 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ (Cuadro 2). Estos valores fueron similares a los obtenidos por González *et al.* (2010), con WP_{Et} de 8.6 a 29 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ y de 9 a 25 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ para WP_T .

El índice de cosecha (HI) de los tratamientos (60 y 80% de ET_0) y secano se ajustó debido al estrés hídrico durante el llenado de grano; además, en

productivity (WP_T) varied between 18.19 and 22.55 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ (Table 2). These values were similar to those obtained by González *et al.* (2010), with a WP_{Et} of 8.6 to 29 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ and from 9 to 25 $kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$ for WP_T .

The harvest index (HI) of the treatments (60 and 80% of ET_0) and rainfed was adjusted due to the water stress during the filling of the grains; in addition, combined with the temperature stress, all treatments reduced their potential of produced biomass. With 100% of ET_0 , 64 mm of the water table level were saved in comparison with the treatment with 120% of ET_0 ; the difference in yield was 130 $kg\ ha^{-1}$ because the treatment with 120% of ET_0 showed greater water stress in canopy expansion, which, in turn, limited the production of biomass and final yield (Table 3). There could have been a washing of nutrients, as it was the case in the study by Montoya (2013) in which applying a greater water table level up to 120% of ET_0 , did not produce an increase in biomass or in yield in comparison with the 100% of ET_0 treatment.

The highest WP^* value was obtained with 100% of ET_0 and with water stress, they were lower (Figure 3). These results were not contrasted with those already published, and in this regard, Steduto and Albrizio (2005) indicated the absence of explicit values in the literature related to this topic.



Figura 2. Tratamiento de secano (izquierda) y riego complementario (derecha).
Figure 2. Rainfed (left) and supplementary irrigated treatments (right).

Cuadro 2. Análisis de la productividad del agua en Chapingo, México.

Table 2. Analysis of the productivity of water in Chapingo, Mexico.

Parámetro	Tratamiento (% ET ₀)				
	Secano	60	80	100	120
Rendimiento (kg ha ⁻¹)	5260	7470	8870	13060	13190
Lámina de riego (mm)	0	66	167	261	325
Lluvia efectiva (mm)	289.1	291.6	291.6	318.1	322.1
ET ₀ (mm)	507.5	508.9	508.9	545.2	549.6
Transpiración (mm)	158.2	211.5	255.1	296.9	302.6
WP _{Et} (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	10.36	14.68	17.43	23.95	24.00
WP _T (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	18.19	20.89	19.34	22.55	20.38
WP _{tr} (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	33.25	35.32	34.77	43.99	43.59
WP _(Rj-Ri) (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	-----	33.48	13.86	44.57	2.03

ET₀: evapotranspiración de referencia; WP_{Et}: productividad del agua consumida; WP_T: productividad del agua total; WP_{tr}: productividad del agua transpirada; WP_(Rj-Ri): productividad del agua entre tratamientos de riego ♦ ET₀: reference evapotranspiration; WP_{Et}: productivity of the water consumed; WP_T: productivity of total water; WP_{tr}: productivity of transpired water; WP_(Rj-Ri): productivity of water among irrigation treatments.

combinación con el estrés por temperatura todos los tratamientos disminuyeron su potencial de biomasa producida. Con 100% de ET₀ el ahorro fue 64 mm de lámina de riego, respecto al tratamiento con 120% de ET₀; la diferencia de rendimiento fue 130 kg ha⁻¹ porque el tratamiento 120% de ET₀ mostró estrés hídrico mayor en expansión de dosel lo cual limitó, a su vez, la producción de biomasa y rendimiento final (Cuadro 3). Podría haber lavado de nutrientes como

CONCLUSIONS

The hypothesis of the study was not rejected because the treatment of the supply of 100% of ET₀ favored a greater production of biomass, since every day it replaced the total water evaporated from the soil and transpired by maize crop, during the stages of flowering and filling of the grain. Also, the yields with supplementary irrigation water table levels of 60

Cuadro 3. Resultados de la simulación con el modelo AquaCrop.

Table 3. Results of the simulation with the AquaCrop model.

Parámetro	Tratamiento (% ET ₀)				
	Secano	60	80	100	120
Biomasa (Mg ha ⁻¹)	13.65	18.4	21.92	25.18	25.67
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	5.13	7.55	8.99	13.09	13.35
Biomasa potencial (Mg ha ⁻¹)	20.804	22.46	23.57	27.04	28.89
ET ₀ (mm)	507.5	508.9	508.9	545.2	549.6
WP (kg m ⁻³)	1.52	2.02	2.14	2.76	2.77
HI ajustado (%)	37.6	41.1	41	52	52
Lluvia (mm)	289.1	291.6	291.6	318.1	322.1
Evaporación (mm)	187	179.5	174.1	177.9	180.1
Transpiración (mm)	158.2	211.5	255.1	296.9	302.6
Estrés por temperatura					
Biomasa (%)	10	11	14	15	15
Estrés hídrico					
Expansión de dosel (%)	18	18	7	7	12
Cierre estomatal (%)	12	4			

ET₀: evapotranspiración de referencia, WP: productividad del agua, HI: índice de cosecha ♦ ET₀: reference evapotranspiration, WP: water productivity, HI: harvest index.

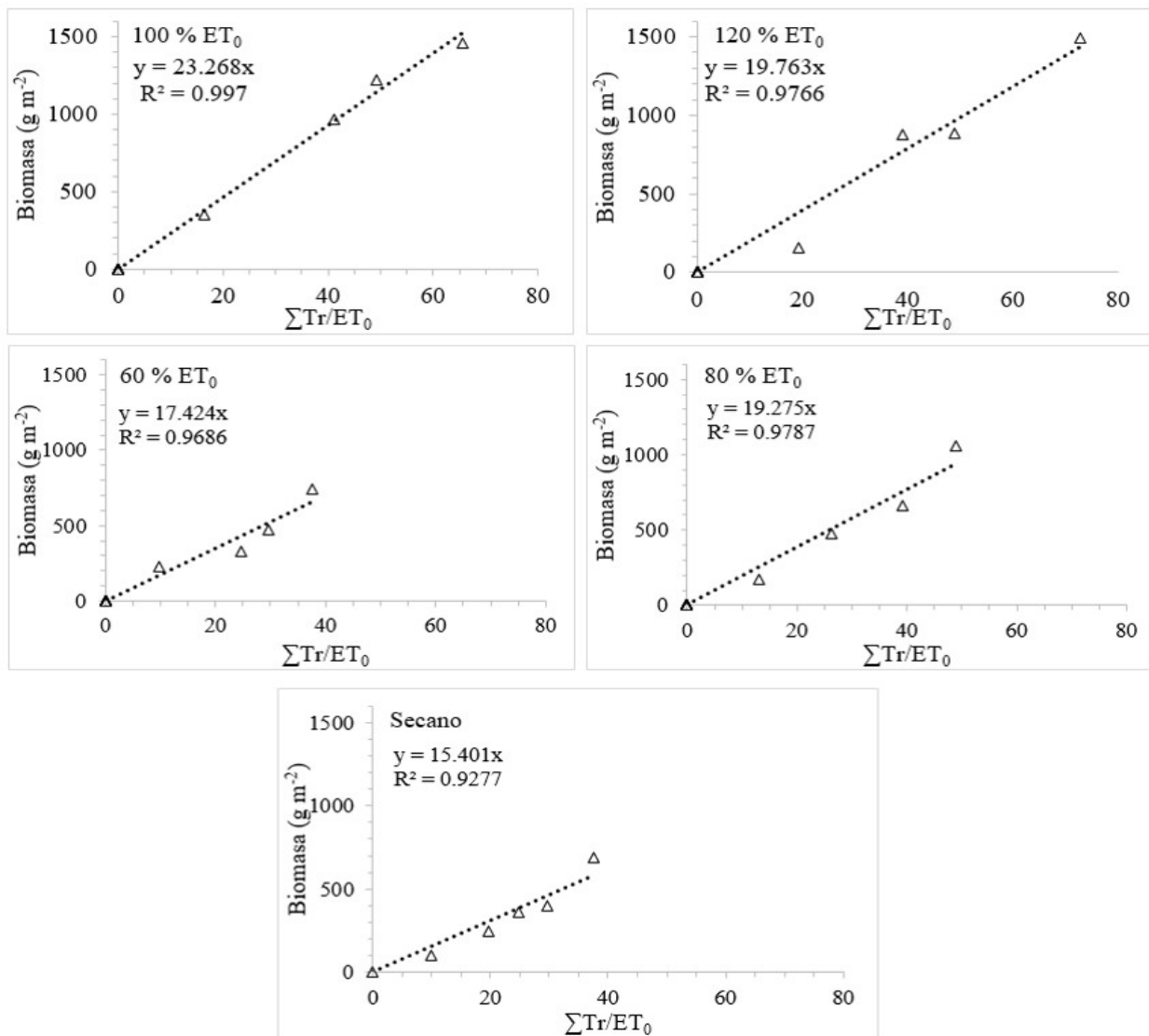
sucedió en el estudio de Montoya (2013) en el cual al aplicar una lámina mayor de riego en 120% de ET_0 , no hubo aumento de biomasa ni de rendimiento respecto al tratamiento con 100% de ET_0 .

El valor máximo de WP^* se obtuvo con 100% de ET_0 , y con estrés hídrico fueron inferiores (Figura 3). Estos resultados no se contrastaron con los ya publicados y, al respecto, Steduto y Albrizio (2005) indicaron la ausencia de valores explícitos en la literatura relacionados con este tema.

and 80% of ET_0 surpassed the potential yield of the area (Texcoco, state of Mexico) and the national yield average.

Since normalized water productivity (WP^*) is an input parameter of the AquaCrop model, it helps study supplementary irrigation strategies to improve maize yield in the region and to promote a greater water use efficiency.

—End of the English version—



Tr: transpiración y ET_0 : evapotranspiración de referencia ♦ Tr: transpiration and ET_0 : reference evapotranspiration.

Figura 3. Determinación de la productividad del agua observada en los cinco tratamientos.
Figure 3. Determination of water productivity observed in the five treatments.

CONCLUSIONES

La hipótesis del estudio no se rechazó porque el tratamiento del abastecimiento de 100% de ET_0 propició la producción mayor de biomasa, ya que cada día repuso el agua total evaporada del suelo y la transpirada por el cultivo de maíz, durante las etapas de floración y llenado de grano. También los rendimientos con láminas complementarias de 60 y 80% de ET_0 superaron al rendimiento potencial de la zona (Texcoco, estado de México) y al promedio nacional.

Debido a que la productividad del agua normalizada (WP^*) es un parámetro de entrada del modelo AquaCrop, permite estudiar estrategias de riego complementario para mejorar el rendimiento del cultivo de maíz en la región y promover una mayor eficiencia en el uso del agua.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. www.fao.org/publications (Consulta: mayo 2018).
- Alvarez, A., J. A. Morábito, and C. Schilardi. 2016. Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *Rev. Fca. UNCUYO* 48:161-177.
- Araya, A., I. Kisekka, and J. Holman. 2016. Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrig. Sci.* 34: 465-481.
- Farahani, H. J., G. Izz, and T. Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop Model for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.* 101: 469-476.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 2016. Panorama Agroalimentario Maíz 2016. www.gob.mx (Consulta: mayo 2018).
- González R., F., J. Herrera P., T. López S., y G. Cid L. 2010. Productividad del agua en el cultivo de maíz en condiciones del sur de la Habana. *Ing. Agríc. Biosistem.* 2: 81-86.
- Greaves, G. E., and Y-M. Wang. 2016. Assessment of FAO AquaCrop Model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water.* 8: 557.
- Guendouz, A., M. Hafsi, L. Moumeni, Z. Khebbat, and A. Achiri. 2014. Performance evaluation of AquaCrop model for durum wheat (*Triticum durum Desf.*) crop in semiarid conditions in Eastern Algeria. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci* 3: 168-176.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2017. Agenda Técnica Agrícola de Estado de México. <http://www.inifap.gob.mx> (Consulta: mayo 2018).
- Jin, Z., Q. Zuang, Z. Tan, J. S. Dukes, B. Zheng, and J. M. Melillo. 2016. Do maize models capture the impacts of heat and drought stresses on yield? Using algorithm ensembles to identify successful approaches. *Glob. Chang. Biol.* 22: 3112-3126.
- Mhizha, T., S. Geerts, E. Vanuytrecht, A. Makarau, and D. Raes. 2014. Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA* 40: 233-244.
- Montoya S., F. 2013. Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete. 270 p.
- Salemi, H., M. A. Mohd S., S. F. Mousavi, A. Ganji, T. Shui L., M. Kamil Y., M. and V. Reza V. 2011. Irrigated silage maize yield and water productivity response to deficit irrigation in an arid region. *Pol. J. Environ. Stud.* 20: 1295-1303.
- Steduto, P., and R. Albrizio. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea II. Water efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 130: 269-281.
- Steduto, P., D. Raes, T. C. Hsiao, E. Fereres, and L. Heng, L. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. www.fao.org/publications. (Consulta: mayo 2018).
- Stricevic, R., M. Cosica, N. Djurovica, B. Pejic, and L. Maksimovic. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower Agricultural. *Water Manage.* 98: 1615- 1621.
- Vanuytrecht, E., D. Raes, and P. Willems, P. 2014. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environ. Modell. Softw.* 51: 323-332.