

EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN, TASA DE ASIMILACIÓN NETA E INTEGRAL TÉRMICA EN FUNCIÓN DEL FÓSFORO EN MAÍZ (*Zea mays* L.)

RADIATION-USE EFFICIENCY, NET ASSIMILATION RATE AND THERMAL INTEGRAL AS A FUNCTION OF PHOSPHORUS IN MAIZE (*Zea mays* L.)

Ernesto Díaz-López^{1*}, Juan M. Loeza-Corte¹, Jesús M. Campos-Pastelín¹,
Edgar J. Morales-Rosales², Aurelio Domínguez-López², Omar Franco-Mora²

¹Ingeniería en Agroindustrias, Universidad de la Cañada. UNCA. Carretera Teotitlán-San Antonio Nahuatipam Km. 1.7. 68540. paraje Titlacuatitla, Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca. México. (lernersto@colpos.mx). ²Programa de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (PCARN), Universidad Autónoma del Estado de México. UAEM. Instituto Literario # 100, Col. Centro. 50000. Toluca, Estado de México, México.

RESUMEN

El fósforo es un macroelemento esencial para las plantas y junto con factores ambientales, como la radiación y la temperatura, influye en el crecimiento y rendimiento de los cultivos como el maíz (*Zea mays* L.). El objetivo del presente estudio fue comparar el efecto de seis niveles de fósforo (0, 40, 80, 120, 160 y 200 kg de P₂O₅ ha⁻¹) en la eficiencia en el uso de la radiación, la tasa de asimilación neta y las unidades calor de los cultivares de maíz Amarillo Almoloya, Cacahuacintle y Cóndor, en condiciones de punta de riego, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con arreglo factorial; los 18 tratamientos resultaron de las combinaciones de los tres cultivares y los seis niveles de fósforo. Los datos se analizaron con un ANDEVA y las medias de los tratamientos con la prueba DSH ($p \leq 0.05$). El análisis de los resultados indicó que Cacahuacintle respondió mejor al ambiente de estudio con 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹, ya que tuvo mayor rendimiento (7136.7 kg ha⁻¹), eficiencia en el uso de la radiación (EUR; 0.33 MJ m⁻²) y tasa de asimilación neta (TAN; 0.023 g m⁻² día⁻¹) que los otros cultivares. Se concluyó que el fósforo afecta EUR, el crecimiento y el rendimiento de maíz con dosis bajas (0 y 40 kg ha⁻¹) y altas (160 y 200 kg ha⁻¹).

Palabras clave: cultivares, polinización libre, rendimiento agronómico, unidades calor, *Zea mays*.

ABSTRACT

Phosphorus is an essential macroelement for plants and along with environmental factors, such as radiation and temperature influences the growth and yield of crops such as maize (*Zea mays* L.). The aim of this study was to compare the effect of six levels of phosphorus (0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg P₂O₅ ha⁻¹) on radiation-use efficiency, net assimilation rate and heat units of the maize cultivars Amarillo Almoloya, Cacahuacintle and Cóndor, in tip irrigation conditions in the Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico. The experiment was a randomized complete block design with a factorial arrangement; the 18 treatments were combinations of three cultivars and six levels of phosphorus. Data were analyzed with an ANOVA and treatment means with the HSD test ($p \leq 0.05$). Analysis of results indicated that Cacahuacintle responded better to the study environment with 80 kg P₂O₅ ha⁻¹, since it had higher yield (7136.7 kg ha⁻¹), radiation-use efficiency (RUE; 0.33 MJ m⁻²) and net assimilation rate (NAR, 0.023 g m⁻² day⁻¹) than the other cultivars. It was concluded that phosphorous affect RUE, corn growth and yield with low (0 and 40 kg ha⁻¹) and high doses (160 and 200 kg ha⁻¹).

Key words: cultivars, open pollination, agronomic yield, heat units, *Zea mays*.

INTRODUCTION

Solar radiation, as an environmental factor, is important for living beings because is the source of energy for physical and biological processes; plants depend on it to produce carbohydrates

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2012. Aprobado: enero, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 135-146. 2013.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar, como factor ambiental, es importante para los seres vivos porque es la fuente de energía para procesos físicos y biológicos, de ella dependen los vegetales para elaborar carbohidratos mediante la fotosíntesis (Taiz y Zeiger, 2002). La radiación, al interactuar con otros factores como la temperatura y precipitación, influye en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Rivetti, 2007). Así, la agricultura es una forma de cosechar la energía solar cuando se complementa con un adecuado suministro de agua, nutrimentos y dióxido de carbono (Castillo *et al.*, 2007). Los efectos de la radiación solar sobre las plantas se clasifican en: 1) fotoenergéticos, que involucran la fotosíntesis y 2) fotoestimulantes, relacionados con el crecimiento y los movimientos násticos (Salisbury y Ross, 1994). La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) se usa para estudiar el efecto de la radiación incidente en los cultivos (De la Casa *et al.*, 2011). Así, Giménez *et al.* (1994) cuantificaron valores mayores de EUR con densidades altas de plantas (5.7 m^{-2}) que con densidades bajas (2.9 m^{-2}). La densidad de población alta de soya (*Glycine max* L.) intercepta mayor cantidad de radiación, incrementa la biomasa (1400 g m^{-2}) y afecta el índice de área foliar (IAF) con valor de 4.0 (Mercau *et al.*, 2001). El nitrógeno también influye en el desarrollo vegetativo y modifica EUR en girasol (*Helianthus annuus* (L) RB).

La tasa de asimilación neta (TAN) indica la cantidad de biomasa acumulada en función del área foliar y el tiempo (Morales *et al.*, 2006; Morales *et al.*, 2009). Al respecto, Pearcy *et al.* (1994) señalaron que TAN es una medida de la eficiencia de las hojas para producir nuevo crecimiento vegetal y tiene mayor importancia que otras variables fisiológicas, como la tasa de crecimiento relativo (TCR). Así, Flores *et al.* (2009) mostraron que tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) para semilla alcanzaron un valor máximo de TAN ($10 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), a pesar de ser una especie con metabolismo C3, cuando crecieron con 100 % de la radiación durante todo el ciclo de cultivo, y disminuyó en las plantas que crecieron con 40 y 70 % de radiación incidente.

El efecto de la temperatura en el desarrollo de los cultivos se evalúa con la integral térmica o con los grados día de desarrollo (Díaz *et al.*, 2012). Esta

through photosynthesis (Taiz and Zeiger, 2002). Radiation in interaction with other factors such as temperature and precipitation affects crop growth and yield (Rivetti, 2007). Thus, agriculture is a way to harvest solar energy when supplemented with an adequate supply of water, nutrients and carbon dioxide (Castillo *et al.*, 2007). The effects of solar radiation on plants are classified as: 1) photo-energetic ones involving photosynthesis and 2) photo-stimulating ones, related to growth and nastic movements (Salisbury and Ross, 1994). Radiation use efficiency (RUE) is used to study the effect of incident radiation on crops (De la Casa *et al.*, 2011). Thus, Giménez *et al.* (1994) quantified greater values of RUE with high plant densities (5.7 m^{-2}) than with low densities (2.9 m^{-2}). The high population density of soybean (*Glycine max* L.) intercepts more radiation, increases biomass (1400 g m^{-2}) and affects leaf area index (LAI) with value of 4.0 (Mercau *et al.*, 2001). Nitrogen also affects vegetative development and modifies RUE in sunflower (*Helianthus annuus* (L) RB).

Net assimilation rate (NAR) indicates the amount of biomass accumulated in terms of leaf area and time (Morales *et al.*, 2006, Morales *et al.*, 2009). In this regard, Pearcy *et al.* (1994) reported that NAR is a measure of the efficiency of leaves to produce new vegetative growth and is more important than other physiological variables, such as relative growth rate (RGR). Thus, Flores *et al.* (2009) showed that potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) for seed reached a maximum value of NAR ($10 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), despite being a species with C3 metabolism when they grew with 100 % of radiation throughout the growing season and decreased in plants that grew with 40 and 70 % of incident radiation.

The effect of temperature on crop development is evaluated with the thermal integral or with the growing degree days (GDD) (Díaz *et al.*, 2012). This variable relates ambient temperature to phenological stages of the crop and can predict when a phenological stage will occur and even calculates the crop yield (Kantolic and Slafer, 2001).

The aim of this study was to evaluate the effect of six levels of phosphorus in three cultivars of maize (*Zea mays* L.), the thermal integral on RUE, NAR and corn yield. The hypothesis was that phosphorus levels affect RUE, NAR and yield of corn.

variable relaciona la temperatura ambiental con las etapas fenológicas del cultivo y permite pronosticar cuándo ocurrirá una etapa fenológica e incluso calcula el rendimiento de un cultivo (Kantolic y Slafer, 2001).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de seis niveles de fósforo en tres cultivares de maíz (*Zea mays* L.), la integral térmica sobre la EUR, la TAN y el rendimiento de maíz. La hipótesis fue que los niveles de fósforo afectan la EUR, la TAN y el rendimiento de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en condiciones de campo, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, (19° 24' N, 99° 54' O; 2600 msnm). Se aplicó un riego hasta alcanzar la capacidad de campo antes del surcado. El suelo fue tipo vertisol en proceso de formación, con pH 6.6 a 0.30 m de profundidad, 2.6 % de materia orgánica, 5.8 mg P kg⁻¹ (determinado con el método propuesto por Bray y Kurtz de acuerdo con Díaz *et al.*, 2011), capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 0.5 Cmol(+) kg⁻¹ de suelo seco al aire, conductividad eléctrica (CE) 0.03 dSm⁻¹, y 5.1 mg Ca kg⁻¹ y 15 mg Mg kg⁻¹ intercambiables. El clima de la región es Cwleg, que corresponde a clima templado, con lluvias en verano y precipitación de 800 a 1250 mm, temperatura media anual de 12 °C (de 7 a 14 °C) y mayo el mes más cálido antes del solsticio de verano (García, 2005).

El diseño experimental fue bloques completos al azar con arreglo factorial de dos factores: 1) los cultivares Amarillo Almoloya, Cacahuacintle (ambos de polinización libre) y Cándor (híbrido), cultivados con densidad de 7.5 plantas m⁻²; 2) el nivel de fertilización fosfatada (superfosfato de calcio triple) 0, 40, 80, 120, 160 y 200 kg ha⁻¹, aplicado con la siembra. Además, todo el cultivo fue fertilizado con 190 kg ha⁻¹ de N (urea, 46 % N) y 60 kg ha⁻¹ de K₂O (60 % K). La unidad experimental tuvo cinco surcos de 4 m de largo, con separación de 0.80 m y la parcela útil tuvo los tres surcos centrales.

Hubo cuatro muestreos destructivos a los 34, 63, 95 y 120 d después de la siembra (dds) (Arenas *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2011) y se midió biomasa seca (BS) del vástago. Se separaron las hojas, el tallo, las brácteas e inflorescencias masculina y femenina, se secaron 72 h a 70 °C hasta alcanzar su peso constante, en una estufa con aire forzado, y se pesaron en una balanza analítica. El rendimiento de grano (R) se evaluó en madurez fisiológica (humedad de 13 %) y se obtuvo el promedio de 10 mazorcas (g planta⁻¹).

La radiación interceptada (RI) se midió a los 34, 63, 95 y 120 dds, con un sensor lineal modelo (Li-Cor, 191) que mide RI

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted under field conditions in Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico, (19° 24' N, 99° 54' W; 2600 m above sea level). Irrigation was applied to reach field capacity before furrowing. Soil was a vertisol type in formation, with pH 6.6 to 0.30 m deep, 2.6 % organic matter, 5.8 mg P kg⁻¹ (determined with the method proposed by Bray and Kurtz according to Díaz *et al.*, 2011), cation-exchange capacity (CEC) of 0.5 Cmol(+) kg⁻¹ of air-dried soil, electrical conductivity (EC) 0.03 dSm⁻¹, and 5.1 mg Ca kg⁻¹ and 15 mg Mg kg⁻¹ interchangeable. Climate of the region is Cwleg corresponding to temperate climate, with summer rainfall and precipitation of 800-1250 mm, average annual temperature 12 °C (7 to 14 °C), and May is the warmest month before the summer solstice (García, 2005).

The experiment design was a randomized complete block with a factorial arrangement of two factors: 1) the cultivars Amarillo Almoloya and Cacahuacintle (both of open pollination) and Cándor (hybrid), cultivated with density of 7.5 plants m⁻². 2) the level of phosphate fertilization (calcium triple superphosphate) 0, 40, 80, 120, 160 and 200 kg ha⁻¹, applied with the sowing. Furthermore, the whole crop was fertilized with 190 kg ha⁻¹ of N (urea, 46 % N) and 60 kg ha⁻¹ of K₂O (60 % K). The experimental unit had five rows of 4 m long with spacing of 0.80 m and the useful plot had the three central rows.

There were four destructive samplings at 34, 63, 95 and 120 d after sowing (das) (Arenas *et al.*, 2011, Díaz *et al.*, 2011) and dry biomass (DB) of the shoot was measured. Leaves, stems, bracts and male and female inflorescences were separated, dried for 72 h at 70 °C up to reach constant weight in a forced air oven, and weighed on an analytical balance. Grain yield (R) was evaluated at physiological maturity (13 % moisture) and an average of 10 ears (g plant⁻¹) was obtained.

Intercepted radiation (IR) was measured at 34, 63, 95 and 120 das, with a linear sensor model (Li-Cor, 191) which measures IR in percentage and photosynthetically active radiation (PAR) between 400-700 nm. RUE was calculated with the equation $RUE = \frac{R}{PAR}$, where R is the yield and PAR is the photosynthetically active radiation, determined with data of global radiation (cal cm⁻² d⁻¹) (GR), obtained from the automated weather station of the Agricultural Faculty of the Universidad Autónoma del Estado de México. GR data were multiplied by the constant 0.50, to obtain the PAR values, these, in turn, were multiplied by 0.04148 to transform them into MJ m⁻² d⁻¹ (Soil Science Society of America, 2000). NAR was calculated with the formula $NAR = \left(\frac{PS2 - PS1}{T2 - T1} \right) \left(\frac{\ln AF2 - \ln AF1}{AF2 - AF1} \right)$, where PS1

en porcentaje y la radiación fotosintéticamente activa entre 400 - 700 nm. EUR se calculó con la ecuación $EUR = \frac{R}{RFA}$, donde R es el rendimiento y RFA es la radiación fotosintéticamente activa, determinada con los datos de radiación global ($\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) (RG), obtenidos de la estación meteorológica automatizada de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Los datos de RG se multiplicaron por la constante 0.50, para obtener los valores de RFA, éstos, a su vez, se multiplicaron por 0.04148 para transformarlos a $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Soil Science Society of America, 2000). TAN se calculó con la fórmula $TAN = \left(\frac{PS2 - PS1}{T2 - T1} \right) \left(\frac{\ln AF2 - \ln AF1}{AF2 - AF1} \right)$, donde PS1 y PS2 son los pesos de las estructuras vegetales en los tiempos T1 y T2 de cada muestreo, AF1 y AF2 son las áreas foliares, y $\ln AF1$ y $\ln AF2$ son los logaritmos neperianos del área foliar. Durante el ciclo del cultivo se registraron la temperatura máxima (Tmáx) y mínima (Tmín) diarias para estimar la integral térmica del cultivo con el método residual de Díaz *et al.* (2012), con la ecuación $TT = \left[\frac{Tmáx + Tmín}{2} \right] - TB$, donde TT es el tiempo térmico o integral térmica, Tmáx es la temperatura máxima, Tmín es la temperatura mínima diaria, TB es la temperatura base del cultivo (7°C para maíz) (García y López, 2002).

Los datos fueron analizados mediante ANDEVA, con el procedimiento GLM de SAS (2002) y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba DSH ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura máxima osciló entre 23 y 27°C y la mínima entre 5 y 10°C ; RG durante el ciclo de cultivo fue 3654.7 MJ, osciló entre 14 y 20 MJ, y la máxima se observó durante la primer decena de mayo; la RG menor se presentó en la primer decena de noviembre (Figura 1).

Hubo diferencias significativas entre los cultivares y las dosis de fósforo (Cuadro 1) y la interacción fósforo \times variedad fue significativa. Cacahuacintle presentó la R mayor ($6459.6 \text{ kg ha}^{-1}$) y la de Amarillo Almoloya ($5390.8 \text{ kg ha}^{-1}$) no fue estadísticamente diferente ($p > 0.05$) a la de Cóndor (5597 kg ha^{-1}). La mejor respuesta se observó con 80 kg de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, pues R fue $7136.7 \text{ kg ha}^{-1}$, y la peor fue con 200 kg de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ y con el testigo (R, 5139.4 y $4686.7 \text{ kg ha}^{-1}$). Esta diferencia puede deberse al gran porte arqueotípico y a la respuesta mayor de Cacahuacintle para extraer fósforo. González *et al.* (2006) atribuyeron una respuesta similar

and PS2 are the weights of plant structures in T1 and T2 times of each sampling, AF1 and AF2 are the leaf areas, and $\ln AF1$ and $\ln AF2$ are the napierian logarithms of leaf area. During the growing season we recorded maximum (Tmax) and minimum (Tmin) daily temperature to estimate the thermal integral of the crop with the residual method of Díaz *et al.* (2012), with the equation $TT = \left[\frac{Tmax + Tmin}{2} \right] - TB$, where TT is the thermal time or thermal integral, Tmax is the maximum daily temperature, Tmin is the daily minimum temperature, TB is the base temperature of the crop (7°C for maize) (García and López, 2002).

Data were analyzed by ANOVA with the GLM procedure of SAS (2002) and treatment means were compared with the HSD test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

Maximum temperature ranged between 23 and 27°C and the minimum between 5 and 10°C ; GR during the growing cycle was 3654.7 MJ, ranged between 14 and 20 MJ, and the maximum one was observed during the first twelve days of November (Figure 1).

There were significant differences between cultivars and phosphorus doses (Table 1) and the phosphorus \times variety interaction was significant. Cacahuacintle presented the highest R ($6459.6 \text{ kg ha}^{-1}$) and that of Amarillo Almoloya ($5390.8 \text{ kg ha}^{-1}$) was not statistically different ($p > 0.05$) to Condor (5597 kg ha^{-1}). The best response was observed with 80 kg of $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, because R was $7136.7 \text{ kg ha}^{-1}$, and the worst response was with 200 kg of $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, and with the control (R, 5139.4 and $4686.7 \text{ kg ha}^{-1}$). This difference may be due to the large archetypical size and higher response of Cacahuacintle to remove phosphorous. Gonzalez *et al.* (2006) attributed a similar response to the high genetic variability and adaptation of the cultivar to ecological conditions of the Toluca Valley, because with 80 kg $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ its R was greater than 7000 kg ha^{-1} .

Amarillo Almoloya when interacting with 80 , 120 and 160 kg of $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, achieved maximum R (5370 , 6261 and $6386 \text{ kg of grain ha}^{-1}$), higher R was presented by Cacahuacintle when interacts with 80 kg of $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$; and the hybrid Condor with 80 and 160 kg ha^{-1} (6845 and $5903 \text{ kg of grain ha}^{-1}$)

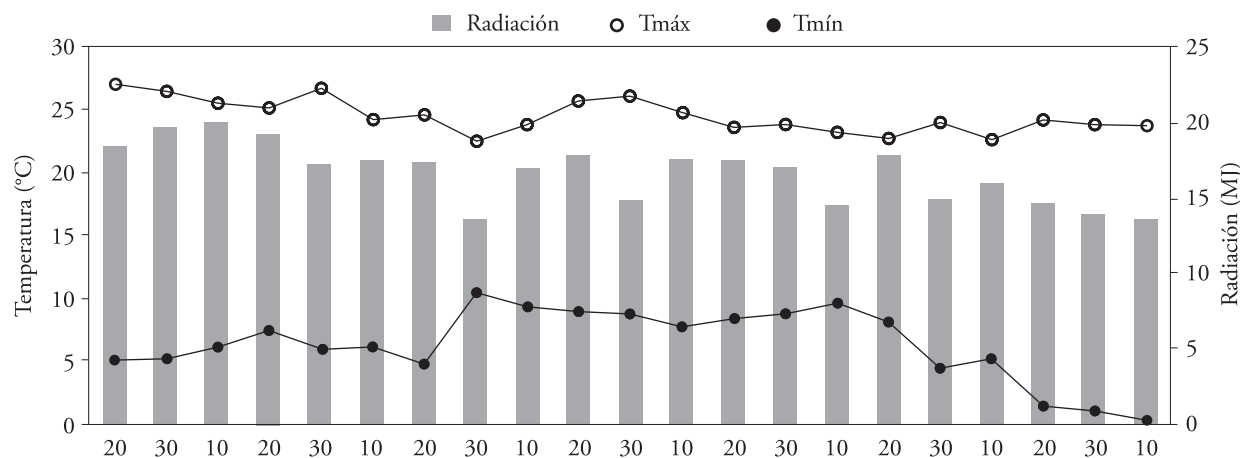


Figura 1. Temperatura máxima (Tmáx), mínima (Tmín) y radiación global (RG) durante el ciclo de cultivo de maíz, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, México, en verano de 2008.

Figure 1. Maximum (Tmax), minimum (Tmin) temperature and global radiation (RG) during the corn growing season in Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico, Mexico, in summer 2008.

Cuadro 1. Cuadros medios y prueba de medias de rendimiento de grano de maíz dependiente de la variedad (Var) y fósforo (P) aplicado en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, México. Verano 2008.

Table 1. Mean squares and mean test of corn grain yield depending on the variety (Var) and phosphorus (P) applied in Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico, Mexico. Summer 2008.

FV	GL	CM	Variedades	R	Fósforo	R
				(kg ha ⁻¹)		
Bloques	2	NS	Amarillo Almoloya	5390.80 b [†]	0	4686.70 d
P	5	**	Cacahuacintle	6459.60 a	40	5523.90 cd
Var	2	**	Cóndor	5597.00 b	80	7136.70 a
P*Var	10	**			120	6023.80 bc
Error	34	NS			160	6384.30 ab
					200	5139.40 d
DSH				484.22		843.48
CV%		10.19		10.19		10.19

[†] Valores medios de tratamientos con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (DSH; $p \leq 0.05$). Var: variedad de maíz, F: fósforo, FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CM: cuadrado medio, R: rendimiento, NS: no significativo, DHS: diferencia significativa honesta, CV: coeficiente de variación. ** $p \leq 0.01$

[‡] Mean values of treatments with different letter in a column are statistically different (HSD; $P \leq 0.05$). Var: corn variety, F: phosphorus, FV: source of variation, GL: degrees of freedom, CM: mean square, R: yield, NS: not significant, DHS: honestly significant difference, CV: coefficient of variation. ** $p \leq 0.01$.

a la gran variabilidad genética y adaptación del cultivar a las condiciones ecológicas del valle de Toluca, pues con 80 kg de P_2O_5 ha⁻¹ su R fue superior a 7000 kg ha⁻¹.

Amarillo Almoloya, al interaccionar con 80, 120 y 160 kg de P_2O_5 ha⁻¹, tuvo R máximas (5370, 6261 y 6386 kg grano ha⁻¹); la R mayor la presentó

(Table 2). These results coincide with those obtained by González *et al.* (2007) with maize Cacahuacintle (5290 kg of grain ha⁻¹) and 80 kg of P_2O_5 ha⁻¹ in El Cerrillo Piedras Blancas, State of Mexico, and contrast with those of Toluqueño popcorn (4200 kg grain ha⁻¹), which is a yellow corn. The authors attributed these responses to higher percentage of

Cacahuacintle al interactuar con 80 kg P₂O₅ ha⁻¹; y el híbrido Cóndor con 80 y 160 kg ha⁻¹ (6845 y 5903 kg de grano ha⁻¹) (Cuadro 2). Estos resultados coinciden con los obtenidos por González *et al.* (2007) con maíz Cacahuacintle (5290 kg grano ha⁻¹) y 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ en El Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, y contrastan con los del maíz palomero Toluqueño (4200 kg grano ha⁻¹), que es un maíz amarillo. Los autores atribuyeron estas respuestas al porcentaje mayor de variación entre los genotipos en los días a floración femenina, acame, pudrición de mazorca y rendimiento de grano.

Hubo diferencias significativas en el efecto de los niveles de fósforo aplicados y las variedades generaron diferencias significativas en la biomasa producida, y la interacción fósforo×variedad fue significativa (Cuadro 3). Cacahuacintle presentó valores de

variación entre genotipos en los días a female flowering, root-lodging, ear rots and grain yield.

There were significant differences in the effect of the applied phosphorous levels and varieties generated significant differences in the biomass produced, and the phosphorous×variety interaction was significant (Table 3). Cacahuacintle presented values of biomass higher than Amarillo and Cóndor, *i.e.*, that was the most efficient in the conversion of solar energy to biomass.

Amarillo Almoloya showed RUE (0.31 and 0.32 g m⁻² MJ⁻¹) greater than Cacahuacintle and Condor when interacting with the two higher rates of P₂O₅; in contrast, these two varieties reached maxima RUE (0.48 and 0.32 g m⁻² MJ⁻¹) with 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ (Table 4). This behavior corresponded with higher R in Cacahuacintle and Cóndor with 80 kg

Cuadro 2. Rendimiento de grano de tres cultivares de maíz en respuesta a seis niveles de fósforo, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. Verano 2008.

Table 2. Grain yield of three corn cultivars in response to six levels of phosphorus in the Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico. Summer 2008.

Factor		Rendimiento(kg ha ⁻¹)
Variedad	Nivel de fósforo (kg ha ⁻¹)	
Amarillo Almoloya	0	4711 b
	40	4994 b
	80	5370 a
	120	6261 a
	160	6386 a
	200	4620 b
Cacahuacintle	0	4553 d
	40	6345 b
	80	9195 a
	120	6486 b
	160	6863 b
	200	5311 c
Cóndor	0	4795 b
	40	5232 b
	80	6845 a
	120	5320 b
	160	5903 a
	200	5486 b
DSH		988

DSH: diferencia significativa honesta. Valores seguidos por letras diferentes son significativamente distintos (p≤0.05) ❖ DSH: Honestly Significant Difference. Values followed by different letters are significantly different (p≤0.05).

biomasa más elevados que Amarillo y Cóndor; es decir, aquél fue el más eficiente en la conversión de la energía solar a biomasa.

Amarillo Almoloya mostró EUR (0.31 y 0.32 g m⁻² MJ⁻¹) mayor que Cacahuacintle y Cóndor al interactuar con las dos dosis altas de P₂O₅; en contraste, estas dos variedades alcanzaron EUR máximas (0.48 y 0.32 g m⁻² MJ⁻¹) con 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (Cuadro 4). Este comportamiento correspondió con la R mayor en Cacahuacintle y Cóndor con 80 kg fósforo ha⁻¹. Estos valores de EUR difieren de los de Andrade *et al.* (1993) de 1.52 a 1.53 g m⁻² MJ⁻¹ también con maíz. Las diferencias pueden deberse a los efectos del sitio donde se realizaron los estudios y a los genotipos utilizados.

Existieron diferencias significativas en TAN entre las variedades en los cuatro muestreos realizados; el fósforo generó diferencias sólo 120 dds y la interacción fue significativa 34 dds. Destacó que el CV fue bajo (entre 16 y 22 %) a los 34, 63 y 95 dds, pero 120 dds el CV tuvo el valor mayor (33.8) (Cuadro 5).

La TAN presentó diferencias significativas dependientes del fósforo únicamente 24 y 120 dds, y las diferencias entre las variedades fueron significativas en los cinco muestreos. Además, la interacción fue significativa a los 34 dds. TAN disminuyó en las tres

phosphorous ha⁻¹. These RUE values differ from those obtained by Andrade *et al.* (1993) of 1.52 to 1.53 g m⁻² MJ⁻¹ also with maize. The differences may be due to the effects of the place where the studies were conducted and the genotypes used.

There were significant differences in NAR between varieties in the four samplings taken; phosphorus generated differences only 120 das and interaction was significant only 34 das. It was outstanding that the CV was low (16 to 22 %) at 34, 63 and 95 das, but 120 das the CV had the highest value (33.8) (Table 5).

NAR showed significant differences dependent on phosphorous only 24 and 120 das and the differences between varieties were significant on five samplings. Furthermore, the interaction was significant at 34 das. NAR decreased in the three varieties along the samplings (Table 6). Thus, the highest values corresponded with the 34 das of which the largest (0.023 g m⁻¹) was that of Cacahuacintle; but, later was surpassed by Amarillo Almoloya and Cóndor at 63 and 95 das.

NAR differences due to phosphorus were observed 34 and 120 das, with 200 kg ha⁻¹ and lower NARs were presented by the control 34 and 120 das (Table 7). This indicates that high levels of phosphorus (200 kg ha⁻¹) increased leaf expansion

Cuadro 3. Cuadrados medios y prueba de medias de eficiencia en el uso de la radiación (EUR) para los factores variedades (Var) y fósforo (P), por maíz, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. Verano 2008.

Table 3. Mean squares and mean test of radiation use efficiency (RUE) for factors varieties (Var) and phosphorus (P), for corn, in the Cerrillo in Piedras Blancas, Estado de Mexico. Summer 2008.

FV	GL	CM	Variedades	EUR (g m ⁻² MJ ⁻¹)	Fósforo (kg ha ⁻¹)	EUR (g m ⁻² MJ ⁻¹)
Bloques	2	NS	Amarillo Almoloya	0.26 b [†]	0	0.22 e
P	5	**	Cacahuacintle	0.33 a	40	0.26 cd
Var	2	**	Cóndor	0.26 b	80	0.35 a
P*Var	10	**			120	0.30 bc
Error	34	NS			160	0.32 ab
					200	0.26 de
DSH				0.02		0.04
CV%		10.20		10.20		10.20

[†] Valores medios de tratamientos con letra diferente en una columna son estadísticamente diferentes (DSH p≤0.05). FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CM: cuadrado medio, EUR: eficiencia en el uso de la radiación, NS: no significativo, DHS: diferencia significativa honesta, CV: coeficiente de variación. ** p≤0.01 ❖

[†] Mean values of treatments with different letter in a column are statistically different (DSH p≤0.05). FV: source of variation, GL: degrees of freedom, CM: mean square, RUE: radiation use efficiency, NS: not significant, DHS: honestly significant difference, CV: coefficient of variation. ** p≤0.01.

Cuadro 4. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) de maíz dependiente de la variedad y fósforo aplicado, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. Verano 2008.

Table 4. Radiation use efficiency (RUE) of corn dependent on the variety and phosphorous applied in the Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico. Summer 2008.

Factor		EUR (g m ⁻² MJ ⁻¹)
Variedad	Nivel de fósforo (kg ha ⁻¹)	
Amarillo Almoloya	0	0.22 b
	40	0.24 b
	80	0.26 b
	120	0.31 a
	160	0.32 a
	200	0.23 b
Cacahuacintle	0	0.22 c
	40	0.31 b
	80	0.48 a
	120	0.35 b
	160	0.36 b
	200	0.27 c
Cóndor	0	0.21 b
	40	0.23 b
	80	0.32 a
	120	0.25 b
	160	0.29 a
	200	0.27 a
DSH		0.050

Valores medios de tratamientos con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (p≤0.05). DSH: diferencia significativa honesta ❖ Mean values of treatments with different letter in a column are statistically different (p≤0.05). DSH: honestly significant difference.

Cuadro 5. Significancia estadística para tasa de asimilación neta de tres variedades de maíz, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, México. Verano 2008.

Table 5. Statistical significance for net assimilation rate of three corn varieties in Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico, Mexico. Summer 2008.

FV	GL	dds			
		34	63	95	120
Bloques	2	NS	NS	NS	NS
Fósforo	5	*	NS	NS	*
Variedades	2	*	*	*	*
P*Var	10	*	NS	NS	NS
CV%		22.5	28.7	16.3	33.8

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, dds: días después de la siembra, NS: no significativo, CV: coeficiente de variación. * p≤0.05 ❖ FV: source of variation, GL: degrees of freedom, dds: days after sowing, NS: not significant, CV: coefficient of variation. * p≤0.05.

variedades a lo largo de los muestreos (Cuadro 6). Así los valores mayores correspondieron con los 34 dds, y de ellos el mayor ($0.023 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fue el de Cacahuacintle; pero después fue superado por Amarillo Almoloya y Cóndor, a los 63 y 95 dds.

Las diferencias de TAN debidas al fósforo se observaron 34 y 120 dds, con 200 kg ha^{-1} y las TAN menores las presentó el testigo 34 y 120 dds (Cuadro 7). Lo anterior indica que los niveles altos de fósforo (200 kg ha^{-1}) incrementaron la expansión foliar y el IAF, con lo que se incrementó la intercepción de radiación (Aguilar *et al.*, 2006); además, incrementó la elaboración de fotosintatos, aumentó la materia seca y se afectó la TAN. La interacción fósforo \times cultivar indicó que los valores mayores de TAN (0.032 , 0.025 y $0.020 \text{ g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) correspondieron a Cacahuacintle con 80 , 160 y $200 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 2) y el valor menor correspondió al testigo de Cóndor ($0.0033 \text{ g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Así, el incremento de TAN parece deberse a la respuesta de los híbridos a la fertilización fosfórica, pues los niveles de fósforo inferiores a 60 kg ha^{-1} mantienen el rendimiento bajo y, en consecuencia, la ganancia de biomasa seca (Aceves *et al.*, 2002).

La integral térmica, o unidades calor se ajustó al modelo lineal $\text{UC}=6.17 \text{ dds}+53.2$ (Figura 3), el

and LAI, which at the same time, increased radiation interception (Aguilar *et al.*, 2006); also increased the elaboration of photosynthates, increased dry matter and thus affected NAR. The phosphorous \times cultivar interaction indicated that higher values of NAR (0.032 , 0.025 and $0.020 \text{ g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) corresponded to Cacahuacintle with 80 , 160 and $200 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ (Figure 2) and the lower value corresponded to Cóndor control ($0.0033 \text{ g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$). So, the NAR increase appears to be due to the hybrid response to phosphorous fertilization, because phosphorous levels below 60 kg ha^{-1} maintain the yield low, and consequently, the gain of dry biomass (Aceves *et al.*, 2002).

The thermal integral or heat units were adjusted to the linear model $\text{UC}=6.17 \text{ das}+53.2$ (Figure 3), total heat time was 1158.6 UC , 77.03 of these accumulated between sowing to emergence (Ve), 677.08 between emergence and male flowering (Vt), 18.49 between male flowering and female flowering (silking stage) (R_1), 59.81 between female flowering and the blister stage (R_2), 49.4 from this stage to the milky grain (R_3), 68.2 from the milky grain to the doughy grain (R_4), 106 from dent grain to full dent grain (R_5) and 102.5 from full dent grain to physiological maturity (R_6).

Cuadro 6. Tasa de asimilación neta (TAN; $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) a 34, 63, 95 y 120 d después de la siembra (dds) de tres variedades de maíz, cultivadas en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. Verano del 2008.

Table 6. Net assimilation rate (NAR, $\text{gm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) at 34, 63, 95 and 120 d after sowing (das) of three varieties of corn grown in the Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico. Summer 2008.

Variedad	dds			
	34	63	95	120
	TAN ($\text{g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)			
Amarillo Almoloya	0.00788 b [†]	0.00199 a	0.00166 a	0.00046 ab
Cacahuacintle	0.02300 a	0.00130 b	0.00127 b	0.00063 a
Cóndor	0.00861 b	0.00160 a	0.00160 a	0.00034 b
DSH	0.00240	0.00040	0.00020	0.00020
CV%	22.50	28.70	16.30	33.80

[†] Valores medios de tratamientos con diferente letra en una columna, son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$); dds: días después de la siembra, DSH: diferencia significativa honesta, CV: coeficiente de variación. \diamond [†] Mean values of treatments with different letter in a column are statistically different ($p \leq 0.05$); dds: days after sowing, DSH: honestly significant difference, CV: coefficient of variation.

Cuadro 7. Valores promedio de TAN ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) a 34, 63, 95 y 120 dds, para el factor niveles de fósforo en maíz, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México. Verano 2008.
Table 7. Average values of NAR ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) at 34, 63, 95 and 120 das for factor phosphorus levels in corn, in the Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico. Summer 2008.

Nivel de fósforo (kg ha^{-1})	dds			
	34	63	95	120
	TAN ($\text{g cm}^{-2} \text{día}^{-1}$)			
200	0.0182 a [†]	0.0022 a	0.0014 a	0.00083 a
160	0.0152 ab	0.0015 a	0.0016 a	0.00040 b
120	0.0135 bc	0.0017 a	0.0014 a	0.00040 b
80	0.0122 bc	0.0015 a	0.0015 a	0.00040 b
40	0.0102 c	0.0017 a	0.0015 a	0.00040 b
0	0.0102 c	0.0018 a	0.0015 a	0.00040 b
DSH	0.0042	NS	NS	0.0003
CV%	22.50	28.70	16.30	33.80

dds, días después de la siembra; DSH, diferencia significativa honesta; CV, coeficiente de variación; [†] valores medios de tratamientos con letra diferente en una columna, son estadísticamente diferentes, (Tukey; $p \leq 0.05$) ♦ dds, days after sowing; DSH, honestly significant difference; CV, coefficient of variation; [†] mean values of treatments with different letter in a column are statistically different, (Tukey; $p \leq 0.05$).

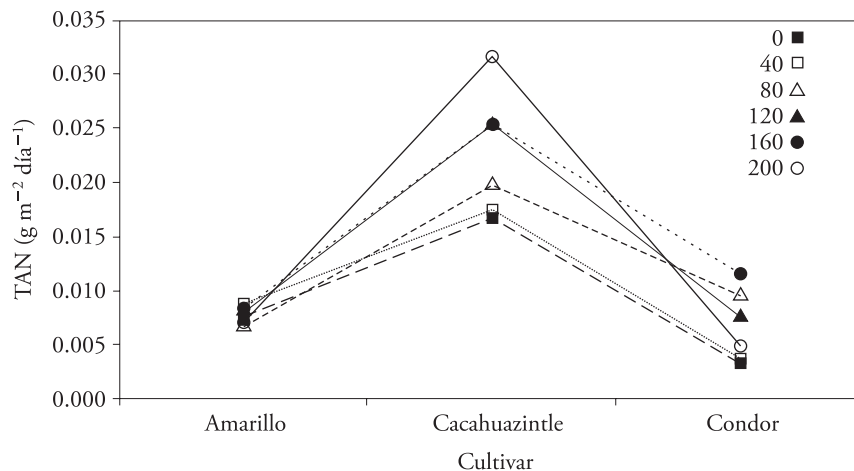


Figura 2. Interacción fósforo*variedad, para tasa de asimilación neta (TAN: $\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) de maíz en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, México. Verano 2008.

Figure 2. Phosphorus*variety interaction for net assimilation rate (NAR: $\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) of corn in the Cerrillo Piedras Blancas, Estado de Mexico, Mexico. Summer 2008.

tiempo térmico total fue 1158.6 UC, 77.03 de estas se acumularon entre la siembra a la emergencia (Ve), 677.08 entre la emergencia y la floración masculina (Vt), 18.49 entre la floración masculina y la floración femenina (R_f), 59.81 entre la floración femenina y

CONCLUSIONS

With the application of phosphorus R of the maize crop was affected; higher R of Cacahuazintle is attributed to a better adaptation to the study area,

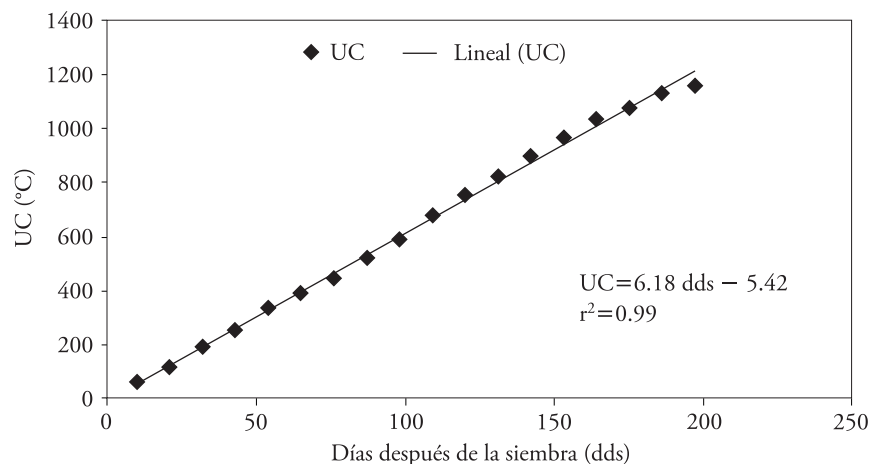


Figura 3. Integral térmica para maíz, en el Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México, México. UC, unidades calor. Verano 2008.

Figure 3. Thermal integral for corn in the Cerrillo in Piedras Blancas, Estado de Mexico, Mexico. UC, heat units. Summer 2008.

el estado de ampolla (R_2), 49.4 de este estado al de grano lechoso (R_3), 68.2 de grano lechoso a grano masoso (R_4), 106 de grano mañoso a grano duro (R_5) y 102.5 de grano duro a madurez fisiológica (R_6).

CONCLUSIONES

Con la aplicación de fósforo se afectó la R del cultivo en maíz; la R mayor de Cacahuazintle se atribuye a su mejor adaptación a la zona de estudio y a su reacción mayor a la ausencia de este nutrimento que Amarillo Almoloya y Cóndor. Los valores elevados de EUR coinciden con los rendimientos altos en de Cacahuazintle y Cóndor. El cultivo de maíz alcanzó su desarrollo ontogénico adecuado desde la siembra hasta la madurez fisiológica, con una integral térmica de 1158.6 UC para la zona de estudio.

LITERATURA CITADA

- Aceves, R. E., F. A. Turrent, F. J. I. Cortéz, y H. V. Volke. 2002. Comportamiento agronómico del híbrido H-137 y materiales criollos de maíz en el valle de Puebla. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4): 339-347.
- Aguilar, L., M. G., S. A. J. Carrillo, P. A. Rivera, y V. A. González H. 2006. Análisis de crecimiento y relaciones fuente demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) *Rev. Fitotec. Mex.* 29(2): 145-156.
- Andrade, F. H., S. A. Uhart, and A. G. Cirilo. 1993. Temperature effects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Res.* 32: 17-25.
- Arenas, J. Y. R., M. R. Delgado, R. E. J. Morales, C. A. Laguna, M. O. Franco, y S. E. Urbina. 2011. Rendimiento de raíces

to its greater reaction to the lack of this nutrient than Amarillo Almoloya and Cóndor. High values of RUE coincide with high yields of Cacahuazintle and Cóndor. The corn crop reached its proper ontogenetic development from planting to physiological maturity, with a thermal integral of 1158.6 UC for the study area.

—End of the English version—



- tuberosas de *Dahlia variabilis* wild (Desf.) bajo diferentes prácticas de manejo agronómico. *PHYTON.* 80: 107-112.
- Castillo, A. M., G. I. Nikolskii, S. C. A. Ortiz, H. Vaquera H., B. G. Cruz, S. E. Mejía, y H. A. González. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia* 32(6): 368-376.
- De la Casa, A., G. Ovando, L. Bressanini, J. Martínez, y A. Rodríguez. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación en papa estimada a partir de la cobertura del follaje. *Agriscientia* 28: 21-30.
- Díaz, L. E., P. J. M. Campos, R. A. Morales, B. G. Salgado, V. A. Castillo, y G. H. Gil. 2012. *Ciencias Agrícolas Informa* 21(2): 86-96.
- Díaz, L. E., R. E. J. Morales, M. O. Franco, y L. A. Domínguez. 2011. Atenuación de luz, radiación interceptada y rendimiento del maíz en función del fósforo. *Terra Latinoamericana* 29: 65-72.
- Díaz, L. E., J. A. Escalante E., M. T. Rodríguez, G., y E. A. Gaytán A. 2011. Producción de frijol ejotero en función del tipo de espaldera. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 16(3): 215-221.
- Flores, L. R., C. F. Sánchez, P. J. E. Rodríguez, A. R. Mora, M. T. Colinas L., y S. H. Lozaya. 2009. Influencia de la

- radiación solar en la producción de semilla – tubérculo de papa bajo cultivo sin suelo. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 15(1): 25-30.
- García, E. 2005. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Ed. UNAM. México. 217p.
- García, P. A. D., y C. López C. 2002. Temperatura base y tasa de expansión foliar del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4): 381-386.
- Giménez, C., D. J. Connor, and F. Rueda. 1994. Canopy development, photosynthesis and radiation use efficiency in sunflower in response to nitrógeno. *Field Crops Res.* 15: 17-37.
- González, H. A., C. J. Sahagún, L. D. Pérez, L. A. Domínguez, C. R. Serrato, F. V. Landeros, y C. E. Dorantes. 2006. Diversidad fenotípica del maíz cacahuazintle en el Valle de Toluca, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(3): 255-261.
- González, H. A., G. L. M. Vázquez, C. J. Sahagún, P. J. E. Rodríguez, y L. D. J. Pérez. 2007. Rendimiento de maíz de temporal y su relación con la pudrición de mazorca. *Agric. Técnica Méx.* 33(1): 33-42.
- Kantolic, A. G., and G. A. Slafer. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Res.* 72: 109-118.
- Mercau, J. L., V. O. Sadras, E. H. Satorre, C. Messina, C. Balbi, M. Uribealbarra, and A. J. Hall. 2001. On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agric. Syst.* 67: 83-103.
- Morales, R. E. J., E. J. A. Escalante, y S. J. A. López. 2009. Biomasa y rendimiento de frijol con potencial ejotero en unicultivo y asociado con girasol. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 15(1): 33-39.
- Morales, R. E. J., E. J. A. Escalante, Ch. L. Tijerina, H. V. Volke, y M. E. Sosa. 2006. Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y de la radiación solar del agrosistema frijol-girasol. *Terra Latinoamericana* 24(1): 55-64.
- Pearcy, R. W., J. Ehleringer, H. A. Mooney, and P. W. Rundel. 1994. *Plant Physiological Ecology*. Chapman & Hall. Great Britain. 457 p.
- Rivetti, R. A. 2007. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. II. Producción de materia seca. *Rev. Fac. Cienc. Agrar.* 38(2): 25-36.
- Salisbury, F. B., y C. W. Ross. 1994. *Fisiología Vegetal*. Grupo Editorial Iberoamérica. pp: 180-204.
- SAS Institute. 2002. *SAS/STAT 9.0 User's guide*. SAS Inst., Cary, NC.
- Soil Science Society of America. 2000. Conversion factor for SI and non – SI units. 44 p.
- Taiz, L., and E. Zeiger. 2002. *Plant Physiology*. Sinauer. U.S.A. pp: 145-150.