

EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO Y NITRÓGENO EN LAS RAÍCES DE VARIEDADES HIBRIDAS Y CRIOLLAS DE MAÍZ (*Zea mays* L.)

EFFECT OF WATER AND NITROGEN STRESS ON ROOTS OF HYBRID AND CREOLE VARIETIES OF MAIZE (*Zea mays* L.)

Villalobos-González, A.^{1*}; López-Castañeda, C.²; Miranda-Colín, S.²; Aguilar-Rincón V.H.²; López-Hernández M.B.²

¹Campo Experimental Edzná-INIFAP. Carretera Campeche-Pocayaxum, km 15.5. Mpio. Campeche Campeche, México. C.P. 24520. Tel: (981) 81 39748. Ext. 100 y 310. ²Genetica, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5 Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230, Tel. 01 595 9520200. Ext. 1587.

*Autor responsable: villalobos.antonio@inifap.gob.mx

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la respuesta de un grupo de variedades híbridas y criollas de maíz (*Zea mays* L.), en términos de acumulación de materia seca de raíces, en condiciones de riego, sequía y deficiencia de nitrógeno en invernadero, se evaluaron dos híbridos antiguos (H-28 y H-30), dos modernos (H-48 y H-50), y dos criollos (grano blanco y azul). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones en un arreglo factorial 4x2, y la unidad experimental fue de un tubo (PVC, 1 m x 4"), lleno con suelo migajón-limoso (CC=33.9% y PMP=21.1%). Las variantes de maíz se sometieron a riego durante su ciclo biológico; S₁ sin riego 10 días (30-40 dds); S₂ sin riego 20 días (50-70 dds), y S₃ sin riego 30 días (70-100 dds) con alto nitrógeno (AN, 160-40-20) y bajo nitrógeno (BN, 80-40-20) aplicado en la siembra. La disminución del contenido hídrico edáfico se reflejó en mayor ($p \leq 0.05$) acumulación de materia seca en raíces en las plantas sometidas a sequía. Las plantas bajo sequía produjeron mayor peso seco de raíces que las de riego. Estas diferencias entre tratamientos de humedad edáfica fueron mayores que las observadas entre niveles de nitrógeno. En promedio la acumulación de materia seca de raíces fue mayor ($p \leq 0.05$) en las variedades mejoradas que en las criollas en condiciones de sequía y deficiencia de nitrógeno.

Palabras clave: maíz, nivel de nitrógeno, sequía.

ABSTRACT

With the objective of evaluating the response from a group of hybrid and Creole varieties of maize (*Zea mays* L.), in terms of accumulation of dry material from roots, under conditions of irrigation, drought and nitrogen deficiency in greenhouse, two old hybrids (H-28 and H-30), two modern (H-48 and H-50), and two Creole (white and blue grain) maize varieties were evaluated. A completely random block design with two repetitions in a 4x2 factorial arrangement was used, and the experimental unit was of one tube (PVC, 1 m x 4"), filled with sandy loam soil (CC=33.9% and PMP=21.1%). The maize variants were subject to irrigation during their biological cycle; S₁, 10 days without irrigation (30-40 dds); S₂, 20 days without irrigation (50-70 dds), and S₃, 30 days without irrigation (70-100 dds) with high nitrogen (AN, 160-40-20) and low nitrogen (BN, 80-40-20) applied in the sowing. The decrease of soil hydric content was reflected in a higher ($p \leq 0.05$) accumulation of dry matter

in the roots of plants subject to drought. The plants under drought produced a higher dry weight of roots than those under irrigation. These differences between soil moisture were higher than those observed between levels of nitrogen. The average accumulation of dry matter from roots was higher ($p \leq 0.05$) in improved varieties than in Creole ones under conditions of drought and nitrogen deficiency.

Keywords: maize, nitrogen level, drought.

INTRODUCCIÓN

Un sistema radicular bien desarrollado con suficiente elongación de la raíz es muy importante para el crecimiento de las plantas, particularmente con suministro limitado de agua y nutrientes (Khan *et al.*, 2012), y características del sistema radical relacionadas con la absorción de nutrientes y agua pueden utilizarse en estrategias de manejo que incrementen la utilización de los mismos (Delgado *et al.*, 2008). El sistema radical en condiciones de sequía y bajo nitrógeno ha sido poco estudiado; las características de la raíz, importantes para un mejor comportamiento del cultivo en condiciones de bajo contenido de nitrógeno, son inexploradas (Smith y Zobel, 1991). Zobel (1975) demostró la amplia capacidad de algunas variedades para modificar sus sistemas radicales en respuesta al estrés, mientras que otras tuvieron menor capacidad de adaptarse al estrés con pérdidas del rendimiento mucho más extremas. Gran parte de esta variación parece ser heredable y, por lo tanto, sujeta a selección con fines de mejoramiento (Zobel, 1991). Estudios iniciales en líneas experimentales de maíz (*Zea mays* L.) bajo diferentes niveles de nitrógeno mostraron amplias diferencias entre líneas en la plasticidad del sistema radical en respuesta a los niveles de nitrógeno (Smith *et al.*, 1995). La mayoría de las técnicas para el estudio de la variabilidad en densidad de raíces en campo tienen la desventaja de ser métodos destructivos, costosos y difíciles de utilizar, por lo que Chloupek (1972 y 1977) propuso la utilización de la capacitancia eléctrica como método para medir el volumen de raíces en estudios de mejoramiento genético. Este método es no destructivo, rápido, barato y permite "observar" las raíces en el campo, particularmente las laterales y las determinantes de 90% de la superficie de absorción (Zobel, 1989). Evaluaciones preliminares del área de la superficie del sistema radical utilizando este enfoque mostraron diferencias entre materiales genéticos, los cuales respondieron de diferente forma a la disponibilidad de nitrógeno (Smith *et al.*, 1995). Al considerar que la variación genética en caracteres de los órganos aéreos de la planta se ha refinado extensivamente a través del mejoramiento en maíz, la variabilidad en el sistema radical ha sido explotada solo

indirectamente a través del mejoramiento a la fecha. La selección directa no-destructiva para caracteres de crecimiento de las raíces puede guiar a ganancias importantes en la productividad del maíz, particularmente en ambientes relacionados con estrés en el suelo (Smith *et al.*, 1995). La vulnerabilidad del cultivo de maíz al estrés ambiental en condiciones de secano se agudiza con el calentamiento global; y en estas condiciones, determinar la respuesta de las plantas a la sequía y deficiencias de nitrógeno será útil para identificar atributos útiles para la selección. El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la respuesta de un grupo de variedades híbridas y criollas de maíz de Valles Altos de México en la acumulación de materia seca de raíces (AMSR) en riego (R) y sequía (S), con alto (AN) y bajo nitrógeno (BN), en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en un invernadero en el área de resistencia a sequía, Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México (19° 21' N, 98° 55' O y 2250 m). Se evaluaron cuatro híbridos de maíz producidos por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para condiciones de secano en Valles Altos y dos materiales criollos colectados en el Municipio de España, Tlaxcala, México. El material genético del INIFAP representa a los híbridos comerciales producidos entre 1960-2000. Los liberados entre 1961 y 1973 se clasifican como antiguos y los de 1999 como modernos (Cuadro 1).

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones en un arreglo factorial 4×2, al corresponder a cuatro

Cuadro 1. Variedades de *Zea mays* L., evaluadas.

Variedad	Año de liberación
H-28 [†]	1961
H-30 [†]	1973
H-48 [‡]	1999
H-50 [†]	1999
Criollo blanco [§]	2013
Criollo azul [§]	2013

[†]Híbrido de cruzada doble, [‡]Híbrido trilineal; [§]Germoplasma recolectado en el Municipio de España, Tlaxcala, por el Dr. Cándido López-Castañeda, Programa de Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México en otoño-invierno 2013.

tratamientos de humedad edáfica y dos niveles de fertilización para todas las variedades. La unidad experimental fue un tubo de PVC de 4" de diámetro y 1 m de largo, con una bolsa cilíndrica de plástico de las mismas dimensiones en su interior, llena con suelo esterilizado de textura migajón-limoso (34% de arena, 56% de limo y 10% de arcilla) con capacidad de campo (CC) de 33.9%, porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) de 21.1% y densidad aparente de 1.08 g cm^{-3} (Laboratorio de Física de Suelos, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México). La siembra se realizó el cinco de mayo de 2013, al utilizar semillas con un peso de $350 \pm 5 \text{ mg}$ en cada unidad experimental.

Los tratamientos de humedad edáfica (HE) y fertilización en el suelo fueron; riego (R), que consistió en mantener la HE cercana a capacidad de campo (CC) hasta la madurez; sequía 1 (S_1) sin R por 10 días (d) cuando las plantas tuvieron 30 días después de la siembra (dds); sequía 2 (S_2) sin R por 20 d cuando las plantas tenían 50 dds, y sequía 3 (S_3) sin R por 30 d para plantas con 70 dds; al finalizar los periodos de sequía se aplicó un riego de recuperación (RR) en cada tratamiento de deficiencias hídricas edáficas con la aplicación de riegos subsecuentes hasta la madurez. Los tratamientos de fertilización se aplicaron al momento de la siembra; alto nitrógeno (AN) con 160-40-20 y bajo nitrógeno (BN) con 80-40-20, al utilizar como fuente de nitrógeno (N), fósforo y potasio; urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio, respectivamente. Para el control de pulgón se aplicó 1 L ha^{-1} Engeo[®] a los 38 dds. Se midió la acumulación de materia seca en las raíces

(AMSR); se obtuvo al sumar el peso seco de las raíces (PSR) extraído de diferentes estratos (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm) del suelo en los diferentes tratamientos de humedad y nitrógeno.

El contenido hídrico edáfico (CHE) se determinó al pesar los tubos tres veces por semana en todos los tratamientos de HE y N; en R se agregó la cantidad de agua perdida por transpiración entre fechas sucesivas de pesaje, manteniendo la humedad cercana a CC hasta la madurez fisiológica (MF); en S_1 se suspendió el R entre los 30 y 40 dds y la humedad aprovechable disminuyó 75% sin alcanzar el PMP (Figura 1a); en S_2 el R se suspendió entre los 50 y 70 dds y la humedad aprovechable descendió por debajo de PMP, entre los 60 y 70 dds (Figura 1b), y en S_3 se dejó de aplicar R entre los 70 y 100 dds y la humedad del suelo disminuyó por debajo del PMP entre los 88 y 100 dds (Figura 1c); se aplicó RR en S_1 , S_2 y S_3 al finalizar los tratamientos de sequía y se aplicaron riegos subsecuentes después del RR hasta la MF. La cantidad total de agua transpirada se calculó al sumar las pérdidas de agua estimadas en cada tubo durante el experimento. Los datos experimentales se analizaron con SAS para Windows Versión 9.0 (SAS, 2002) en forma individual y combinada. Para comparar las medias se usó DMS de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido hídrico del suelo en el tratamiento de R se mantuvo cercano a CC durante el experimento; en S_1 el contenido de humedad en el suelo disminuyó 75% de CC al finalizar el periodo de S (40 dds), en S_2 y S_3 el contenido hídrico del suelo alcanzó un nivel inferior al PMP entre los 60 y 70 dds, y entre los 98 y 105 dds, respectivamente (Figura 1). La cantidad de humedad disponible durante el ciclo de las plantas en R fue favorable para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin que se observaran síntomas de deficiencias hídricas (Figura 1). Las deficiencias hídricas edáficas registradas en S_1 , S_2 y S_3 modificaron el estado hídrico de las plantas con AN y BN, ocasionando diferentes niveles de marchitamiento a medida que el contenido hídrico del suelo fue descendiendo en valores inferiores al PMP (Figura 1). Las deficiencias hídricas edáficas disminuyen severamente el contenido hídrico de la planta, causando altos niveles de estrés y fuertes reducciones en el rendimiento de semilla, biomasa aérea, número de vainas y semillas normales, y peso de la semilla, cuando la S coincide con la floración y la formación de la semilla (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009). Galván-Tovar *et al.* (2006) determinaron que el potencial hídrico foliar de las plantas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo estrés hídrico reflejaron el contenido hídrico del suelo antes del amanecer ($r^2=0.90$), cuando las plantas recuperaron su turgencia durante la noche.

Materia seca en el sistema radical

Las raíces de la planta son los órganos que crecen y se desarrollan en contacto con el suelo, y son las primeras partes de la planta que experimentan los cambios en el contenido hídrico del suelo; la acumulación de materia seca en las raíces (AMSR) fue mayor ($P \leq 0.05$) en las plantas sometidas a S ($S_1=11$, $S_2=12.9$ y $S_3=16.8 \text{ g planta}^{-1}$) que en las plantas bajo R ($8.5 \text{ g planta}^{-1}$) (Cuadro 2); en S_1 , S_2 y S_3 ; la AMSR fue 29.4, 51.8 y 97.6% mayor que en R y estas diferencias entre tratamientos de humedad edáfica fueron mayores que las

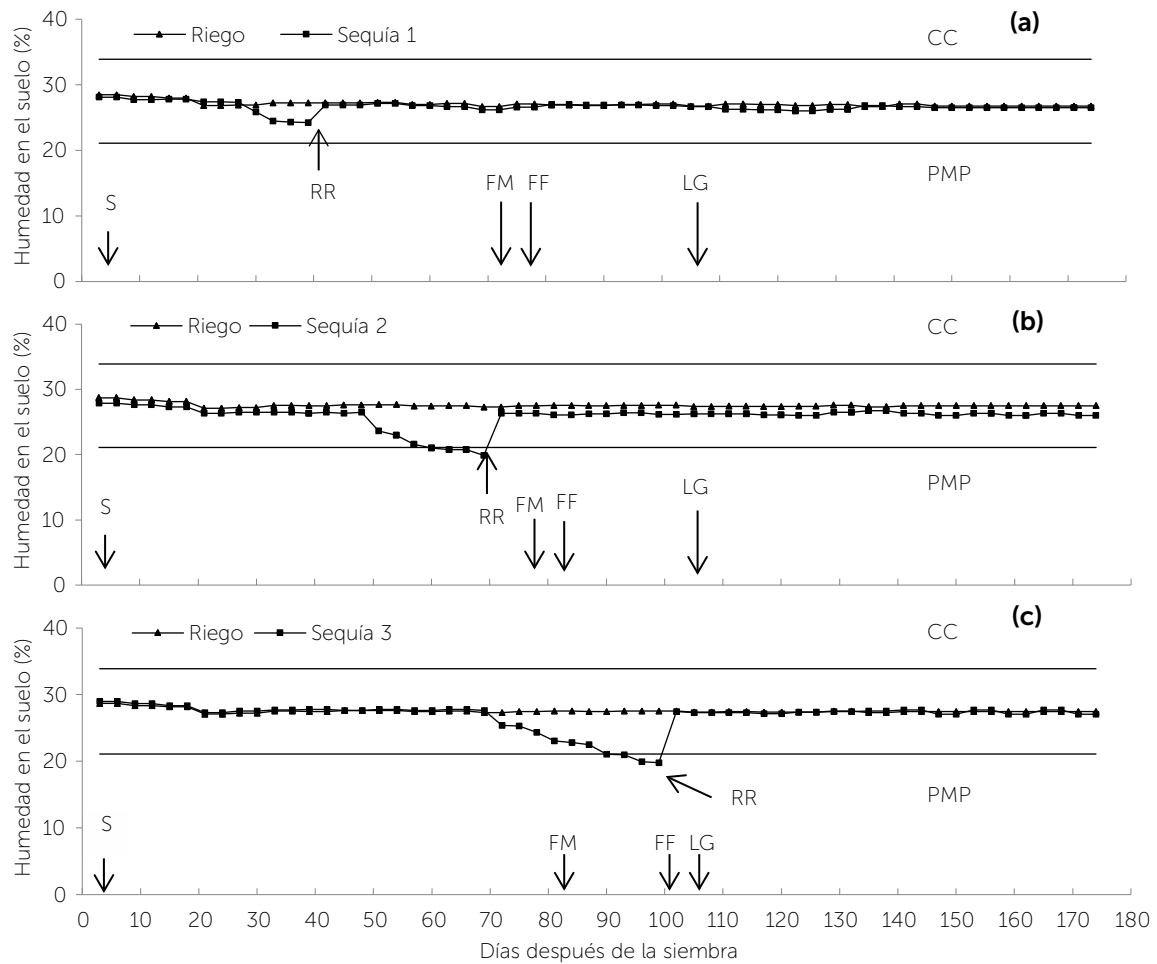


Figura 1. Contenido hídrico del suelo en riego y sequía 1 (a), riego y sequía 2 (b) y riego y sequía 3 (c) en invernadero, ciclo de verano-otoño 2013. Montecillo, Estado de México. CC=capacidad de campo; PMP=porcentaje de marchitamiento permanente; S=siembra; FM=floración masculina; FF=floración femenina; LG=llenado de grano; RR=riego de recuperación.

observadas entre niveles de N (riego con AN=22%; S₁ con AN=5%, S₂ con AN=9% y S₃ con AN=21%) (Cuadro 2); la elongación de las raíces en suelos que experimentan pérdidas de humedad está limitada por una combinación de impedancia o resistencia mecánica a la penetración por las raíces y el estrés hídrico; y se estima

que la elongación de las raíces se reduce 50% en suelos con resistencia a la penetración >0.8-2 MPa en ausencia de estrés hídrico y potencial matricial de -0.5 MPa en ausencia de impedancia mecánica (Bengough *et al.*, 2011). El N que es asimilado por las plantas y sus efectos en las diferentes etapas de su desarrollo, en particular

Cuadro 2. Acumulación de materia seca en raíces de *Zea mays* L., en riego, sequía 1, sequía 2 y sequía 3, con alto (AN) y bajo nitrógeno (BN) en condiciones de invernadero, ciclo de verano-otoño 2013. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Variedades	Riego (g)		Sequía 1 (g)		Sequía 2 (g)		Sequía 3 (g)	
	AN	BN	AN	BN	AN	BN	AN	BN
H-50	9.3	8.3	14.3	13.1	15.6	15.4	21.7	16.3
H-48	11.2	7.4	12.3	11.7	12.6	12.6	21.8	14.3
H-30	8.1	6.3	9.4	9.0	10.6	10.4	17.2	12.8
H-28	7.2	6.5	8.6	8.5	12.1	9.2	17.8	12.5
Criollo Blanco	11.2	9.4	12.0	11.6	15.0	13.8	17.9	17.4
Criollo Azul	9.8	6.4	11.2	10.3	15.0	12.4	16.4	15.7
Media general	9.5	7.4	11.3	10.7	13.4	12.3	18.8	14.8
DMS (P≤0.05)	1.5	1.0	1.0	1.0	1.6	1.45	1.3	1.5

NO₃, puede afectar la tasa de germinación de las semillas, la expansión de la hoja y materia seca de raíz (Andrews *et al.* 2013).

Otros estudios han determinado que el estrés hídrico aumenta la proporción de peso seco de raíces a parte aérea (cociente raíz/parte aérea) (Brouwer, 1983), debido a un desbalance en la asignación de materia seca entre las raíces y los órganos aéreos (Lambers, 1983). Las diferencias en el potencial de turgencia entre las hojas y las raíces pueden causar diferencias en la tasa de alargamiento entre la raíz y la parte aérea como resultado del estrés hídrico, y esto a su vez podría influir en el desbalance en la asignación de materia seca entre la raíz y la parte aérea (Schildwacht, 1988). Las plantas en condiciones de alto nitrógeno en el suelo produjeron mayor cantidad de materia seca en el sistema radical que en bajo nitrógeno; por ejemplo, el H-48 en R (Figura 2a y e) y H-50 en S₁, S₂ y S₃ (Figura 3a, b, c, d, e y f); Bänziger *et al.* (2012) indican que en condiciones de estrés por deficiencia de nitrógeno las plantas de maíz favorecen el crecimiento radical más que el aéreo, y en consecuencia, la proporción raíz/parte aérea aumen-

ta; sin embargo, señalan que la cantidad absoluta de raíces suele ser menor en plantas que padecen estrés por falta de N que las que se siembran con una fertilización de N normal.

CONCLUSIONES

Las variedades híbridas superaron a las criollas en su capacidad de recuperación al estrés hídrico, lo que permitió mayor acumulación de materia seca de raíces en condiciones de sequía y deficiencias de nitrógeno.

LITERATURA CITADA

- Andrews M., Raven J.A., Lea P.J. 2013. Do plants need nitrate? The mechanisms by which nitrogen form affects plants. *Annals of applied biology* 163: 174-199.
- Bänziger M., Edmeades G.O., Beck D., Bellon M. 2012. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de nitrógeno en el maíz: De la teoría a la práctica. México, D.F.: CIMMYT. 61 p.
- Barrios-Gómez E.J., López-Castañeda C. 2009. Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia* 43: 29-35.
- Bengough A.G., McKenzie B.M., Hallett P.D., Valentine T.A. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62: 59-68.
- Brouwer R. 1983. Functional equilibrium: sense or nonsense? *Netherlands Journal of Agricultural Sciences* 31: 335-348.
- Chloupek O. 1972. The relationship between electric capacitance and some other parameters of plant roots. *Biologia Plantarum* 14: 227-230.
- Chloupek O. 1977. Evaluation of the size of a plant's root system using its electrical capacitance. *Plant and Soil* 48: 525-532.
- Delgado R., Castro L., Cabrera B.E., Vicente S.F., Mujica M.J., Canache S., Navarro L., Noguera I. 2008. Evaluación de algunas características del sistema radical del maíz (híbrido INIA 68) cultivado bajo labranza mínima y convencional en un suelo de Maracay, Venezuela. *Agronomía tropical*. 58: 427-438.
- Galván-Tovar M., Kohashi-Shibata J., López-Castañeda C., Acosta-Gallegos J.A., Martínez-Garza A. † y García-Esteva A. 2006. Equilibrio en el potencial hídrico al amanecer entre hojas de frijol común bajo déficit hídrico edáfico. *Ingeniería Hidráulica en México* 21: 69-81.
- Khan M.B., Yousaf F., Hussain M., Haq W.M., Lee D.J., Farooq M. 2012. Influence of planting methods on root development, crop productivity and water use efficiency in maize hybrids. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72: 556-563.
- Lambers H. 1983. "The functional equilibrium", nibbling on the edges of a paradigm. *Netherlands Journal of Agricultural Sciences* 31: 305-311.
- SAS. 2002. Statistical Analysis System. The SAS System Release 9.0 for Windows, SAS Institute.
- Schildwacht G. 1988. Changes in the osmotic potential of the roots as factor in the decrease in the root-shot ratio of *Zea mays* plants under water stress. *Plant and Soil* 111: 271-275.
- Smith M.E., Zobel R.W. 1991. Plant genetic interactions in alternative cropping systems:

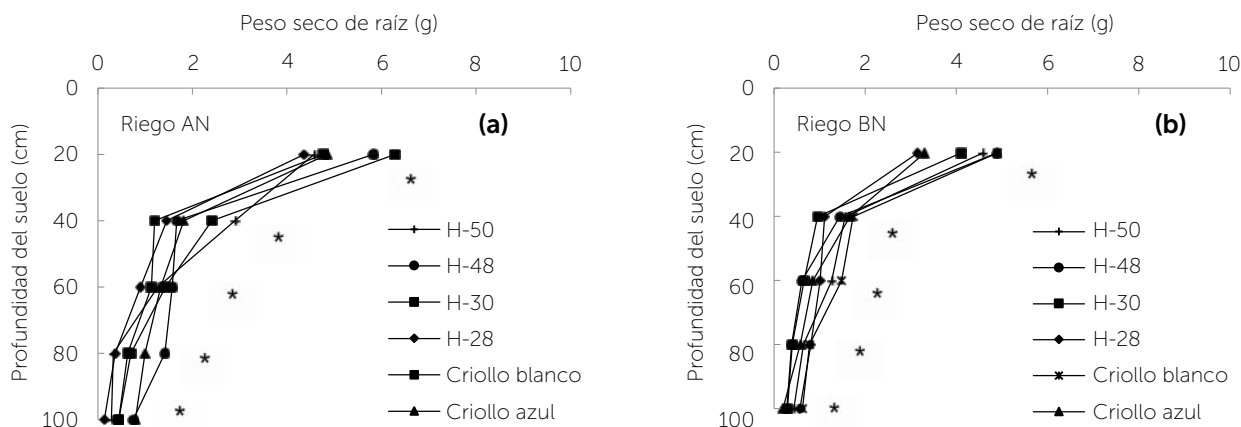


Figura 2. Peso seco de raíz de *Zea mays* L., en riego con alto (a) y bajo nitrógeno (b) en condiciones de invernadero, ciclo de verano-otoño 2013. Montecillo, Texcoco, Estado de México. * Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

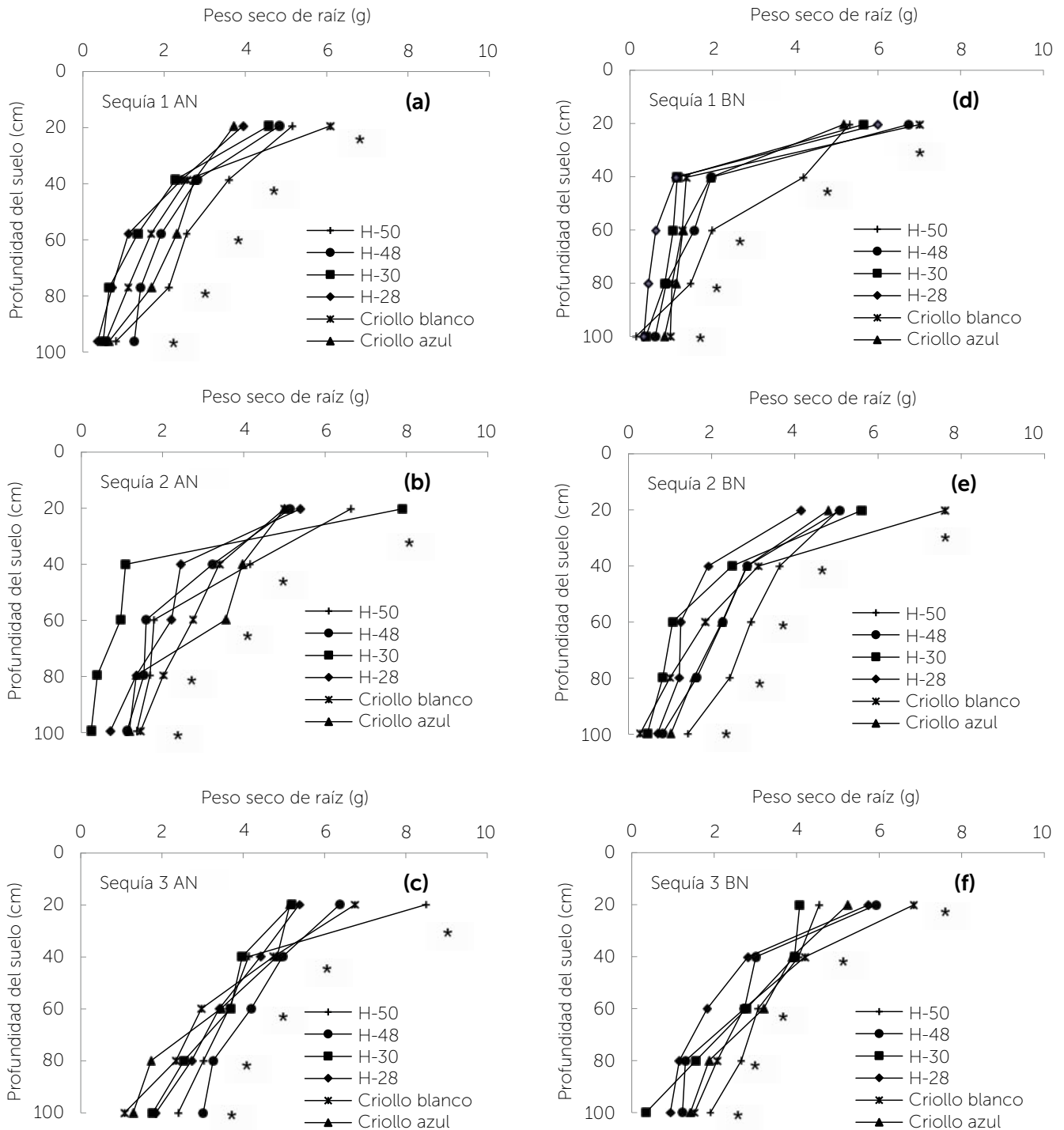


Figura 3. Peso seco de raíz *Zea mays* L., en sequía 1 con alto y bajo nitrógeno (a y d), sequía 2 con alto y bajo nitrógeno (b y e), y sequía 3 con alto y bajo nitrógeno (c y f), en condiciones de invernadero, ciclo de verano-otoño 2013. Montecillo, Texcoco, Estado de México. *Diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Considerations for breeding methods. *In: D.A. Sleper et al. (eds.), Plant Breeding and Sustainable Agriculture: Considerations for Objectives and Methods. CSSA Special Publication No. 18. Madison, WI. U.S.A. Pp. 57-81.*

Smith M.E., Miles C.A., Been J.V. 1995. Genetic improvement of maize for nitrogen use efficiency. *In: D.C. Jewell, S.R. Waddington, J.K. Ransom and K.V. Pixley (eds.). 1995. Maize Research for Stress Environments. Proceedings of the Fourth Eastern and Southern Africa Regional Maize Conference, held at Harare, Zimbabwe, 28 March - 1 April 1994. México, D.F. CIMMYT, Pp. 76-80.*

Zobel R.W. 1975. The genetics of root development. *In: J.G. Torrey and D.F. Clarkson (eds.). The Development and Function of Roots. Academic Press, London. Pp. 261-275.*

Zobel R.W. 1989. Steady-state control and investigation of root system morphology. *In: J.G. Torrey and L. Winship (eds.). Steady-State and Continuous Control of Root Growth. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam. Pp. 165-182.*

Zobel R.W. 1991. Genetic control of root systems. *In: Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafnafi (eds.). Plant Roots: The Hidden Half. Marcel Dekker, New York. Pp. 27-38.*