



## AGRONOMIC CORN HYBRIDS RESPONSE UNDER IRRIGATION AND RAINFED AT TWO SOWING DENSITIES IN HIGH VALLEYS OF MEXICO †

[RESPUESTA AGRONÓMICA DE HÍBRIDOS DE MAÍZ BAJO RIEGO Y SECANO EN DOS DENSIDADES DE SIEMBRA EN VALLES ALTOS DE MÉXICO]

Homero Alonso-Sánchez<sup>1\*</sup>, Margarita Tadeo-Robledo<sup>1</sup>,  
Alejandro Espinosa-Calderón<sup>2</sup>, Consuelo López-López<sup>1</sup>,  
Jobb Anastacio Zaragoza-Esparza<sup>1</sup>, Antonio Turrent-Fernández<sup>2</sup>  
and Karina Yazmine Mora-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (UNAM-FESC), Ingeniería Agrícola, Carretera Cuautitlán – Teoloyucán, Km 2.5, C.P. 54714. Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México. Email: [alonso\\_m77@hotmail.com](mailto:alonso_m77@hotmail.com)\*, [tadeorobledo@yahoo.com](mailto:tadeorobledo@yahoo.com), [jobzaragoza4920@yahoo.com](mailto:jobzaragoza4920@yahoo.com), [karina.mora.ing@gmail.com](mailto:karina.mora.ing@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México (INIFAP-CEVAMEX), Km 13.5 Carretera Los Reyes – Texcoco. C.P. 56250, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. Email: [espinoale@yahoo.com.mx](mailto:espinoale@yahoo.com.mx), [aturrent37@yahoo.com.mx](mailto:aturrent37@yahoo.com.mx)

\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background.** In maize production, irrigation water as an input with monetary value should increase the benefit; rain is the most sustainable source of water, but it does not ensure benefit. **Objective.** To evaluate the agronomic response of corn hybrids under irrigation and rainfed at two sowing densities. **Methodology.** The experiment design was factorial in complete randomized blocks and three repetitions with: genotypes (G) ten materials (G1...G10), two levels of humidity (H) such as irrigation (H1) and rainfed (H2), two planting densities. (D) with D1= 55 thousand plants ha<sup>-1</sup> and D2=75 thousand plants ha<sup>-1</sup>, in two environments (A) in the State of Mexico; Cuautitlan (A1) and Texcoco (A2). **Results.** The general mean of grain yield was 7.1 t.ha<sup>-1</sup> and water use 10.7 kg.mm<sup>-1</sup>. The results of these variables successively for the factors were: The hybrid (IA249AE X FSN 87) X GNF resulted with the highest means 8.9 t.ha<sup>-1</sup> and 13.35 kg.mm<sup>-1</sup>; irrigation presented a higher yield of 7.39 t.ha<sup>-1</sup>, but rainfed was higher in water use with 11.41 kg.mm<sup>-1</sup>; Cuautitlán was higher with 9.4 t.ha<sup>-1</sup> and 13.4 kg.mm<sup>-1</sup>; the D1 density was higher with 7.19 t.ha<sup>-1</sup> and 10.75 kg.mm<sup>-1</sup>. The first-order interactions were significant, at least in one response variable. **Implications:** Additional research is required about water corn productivity to identify the potential of genotypes of corn in Mexico Basin. **Conclusions.** Rainwater availability had a greater effect than irrigation on corn hybrid grain yield and water use in Cuautitlán, and irrigation was less productive at that site. The higher population density responds to the availability of more resources such as water.

**Key words:** *Zea mays*; rainfed; water use; new hybrids.

### RESUMEN

**Antecedentes.** En la producción de maíz, el agua de riego como un insumo con valor monetario debería incrementar el beneficio en especie; la lluvia es la fuente más sustentable de agua, pero no asegura el beneficio. **Objetivo.** Evaluar la respuesta agronómica de híbridos de maíz bajo riego y secano en dos densidades de siembra. **Metodología.** El diseño del experimento fue factorial en bloques completos al azar y tres repeticiones

† Submitted July 24, 2024 – Accepted January 9, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5757>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = M. Tadeo-Robledo: <http://orcid.org/0000-0002-9801-8721>; A. Espinosa-Calderón: <http://orcid.org/0000-0002-7128-4712>

con: genotipos (G), diez materiales (G1...G10), dos niveles de humedad (H) como riego (H1) y secano (H2), dos densidades de siembra (D) con D1= 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> y D2=75 mil plantas ha<sup>-1</sup>, en dos ambientes (A) del Estado de México; Cuautitlán (A1) y Texcoco (A2). **Resultados.** La media general del rendimiento de grano fue 7.1 t.ha<sup>-1</sup> y el uso del agua 10.7 kg.mm<sup>-1</sup>. Los resultados de estas variables para los factores: el híbrido (IA249AE X FSN 87) X GNF resultó con las medias más altas 8.9 t.ha<sup>-1</sup> y 13.35 kg.mm<sup>-1</sup>; el riego presentó rendimiento mayor de 7.39 t.ha<sup>-1</sup>, pero bajo secano fue superior el uso del agua con 11.41 kg.mm<sup>-1</sup>; así también, Cuautitlán fue superior con 9.4 t.ha<sup>-1</sup> y 13.4 kg.mm<sup>-1</sup>; además, la densidad D1 fue superior con 7.19 t.ha<sup>-1</sup> y 10.75 kg.mm<sup>-1</sup>. Las interacciones de primer orden fueron significativas, por lo menos en una variable respuesta. **Implicaciones:** Se requieren investigaciones adicionales sobre productividad del agua del cultivo de maíz en sitios de la Cuenca de México para identificar el potencial de los genotipos. **Conclusión.** La disponibilidad de agua por lluvia tuvo efecto mayor que el riego en rendimiento de grano y uso del agua de los híbridos de maíz en Cuautitlán y el riego resultó contraproducente en ese sitio. La densidad de población mayor responde a medida que se dispone de más recursos como el agua.

**Palabras clave:** *Zea mays*; secano; uso del agua; híbridos nuevos.

## INTRODUCCIÓN

La producción de maíz bajo riego y secano son complementarias y se distinguen por particularidades en el uso del agua. El riego muestra rendimiento mayor por unidad de superficie, pero el uso del agua en secano es sostenible, pues no utiliza infraestructura de riego como equipos de bombeo o presas para el aprovechamiento del agua.

En México la producción de maíz bajo riego representa el 22.4% (1.418 millones de hectáreas) con relación a la superficie bajo secano (6.359 millones de hectáreas). Para los Valles Altos de México (Estado de México, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Querétaro), la superficie bajo riego es del 19.9% (0.342 millones de hectáreas) respecto al área de secano (1.722 millones de hectáreas). En particular, en el Estado de México, el área irrigada es del 20.4% (0.093 millones de hectáreas) respecto a la superficie bajo secano (0.454 millones de hectáreas) (SIAP, 2024). A partir de los valores anteriores, la agricultura de riego es aproximadamente la quinta parte respecto a la agricultura de secano, pero presenta una productividad 3.28 veces mayor, ya que el rendimientos promedio nacional es de 7.38 y 2.25 t.ha<sup>-1</sup> para riego y secano respectivamente. No obstante, el secano tiene potencial para tecnificar e incrementar el rendimiento de maíz, sumado a estrategias como la oferta de variedades mejoradas según lo plantean Tadeo *et al.* (2021), Espinosa *et al.* (2022) y Tadeo *et al.* (2022). En las regiones geoeconómicas de México se muestra un gradiente en producción, relacionado con la precipitación total, esta característica se acentúa en mayor grado hacia el norte del País (Borroel-García *et al.*, 2018).

En México la interpretación de las estadísticas de las últimas dos décadas del SIAP (2024) para el

cultivo de maíz de grano, mostraron que; a nivel nacional hubo un incremento del 15% en la superficie y 18% en el rendimiento en la modalidad de riego, en tanto que, en secano se redujo la superficie sembrada en 11.4%, aunque el rendimiento se incrementó en 10.5%. La reducción de superficie implica la necesidad de tecnificar la producción bajo secano para no depender solamente de la producción de maíz bajo riego, lo que podría ser insostenible en un escenario de reducción de rendimiento como lo plantearon Flores-López *et al.* (2016) cuando el cultivo de maíz se ve afectado por la sequía.

La producción de maíz por unidad de agua de riego o secano muestra valores similares, pero lo que hace más productivo al riego, en términos de grano por unidad de superficie es la disponibilidad oportuna de agua y los volúmenes mayores que utiliza, producto de pérdidas altas de agua como lo reportan Hernández-López *et al.* (2019) para híbridos en el Valle de México.

En un modelo de simulación econométrico, Guzmán-Soria *et al.*, (2011) identificaron a la precipitación como una variable estocástica que tiene un fuerte impacto en la oferta de maíz, pues incide en la disponibilidad de agua para riego y secano, debido a los posibles efectos del cambio climático que anteponen la precipitación como la principal limitante en el potencial productivo del maíz (Flores-López *et al.*, 2016; Baohua *et al.*, 2017).

Por ejemplo, los resultados experimentales indican que el incremento en la producción actual de maíz en el altiplano mexicano tiene mayor potencial en zonas de riego y buen temporal (Espinosa-Calderón *et al.*, 2022; Martínez-Díaz *et al.*, 2024), y podría superar al doble el rendimiento que se ha

obtenido (Arellano-Vázquez *et al.*, 2011, Damián-Huata *et al.*, 2013).

Una ventaja del riego es la disponibilidad del agua en cantidad y oportunidad en periodos de escasez (Palacios y Excebio 2020), sin embargo, es posible que en los ambientes de los Valles Altos donde se presenta precipitación media de 640 mm y suelos fértiles, los híbridos de maíz muestren rendimientos que pudieran igualar o superar los escenarios de riego. Ejemplo de lo anterior se ha manifestado en las evaluaciones de los genotipos de maíz generados en la UNAM e INIFAP, los cuales se han sembrado en ambientes y condiciones de riego de los Valles Altos. Tlaoli Puma bajo punta de riego y secano, (Tadeo *et al.*, 2021). Los híbridos H-47 AE, H-49 AE y H-53 AE bajo punta de riego y secano (Espinosa *et al.*, 2018; Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018); híbridos de cruza simples, bajo punta de riego y secano (López-López *et al.*, 2017); donde la mayoría de los híbridos en condiciones de secano se reportaron con rendimientos similares a los de punta de riego.

Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta agronómica de híbridos de maíz bajo riego y secano en dos densidades de siembra.

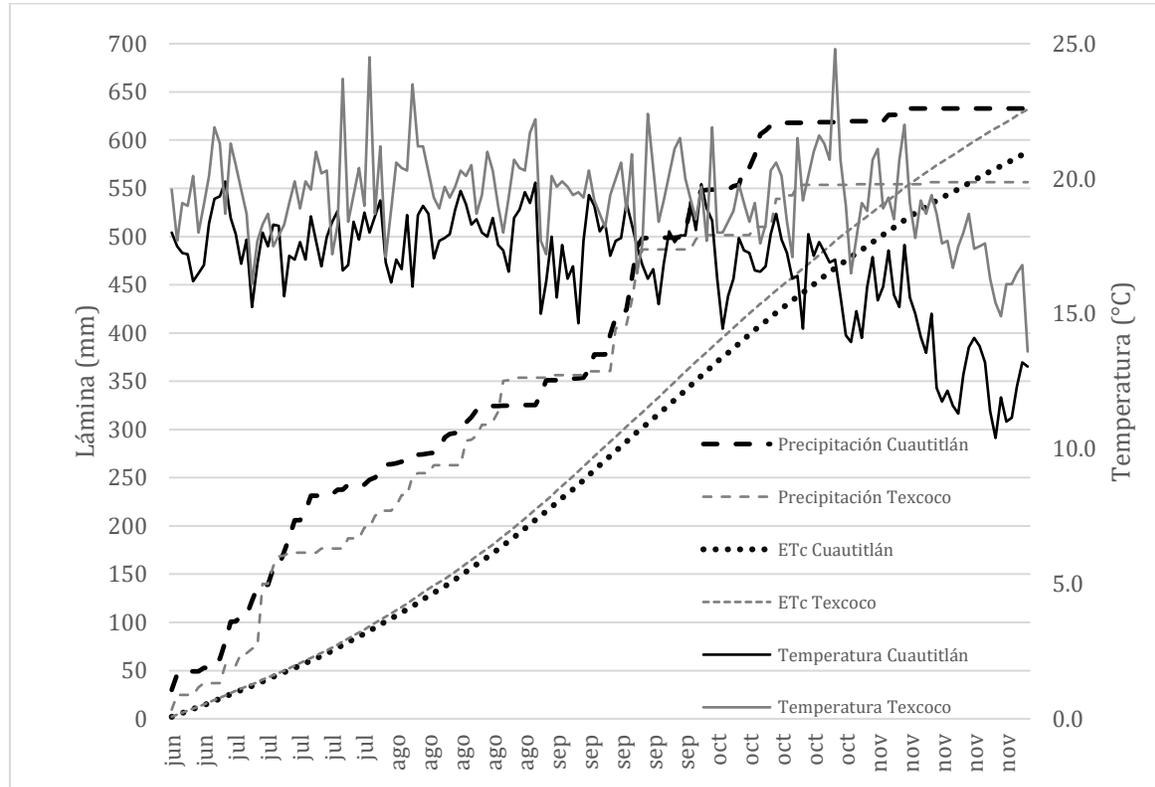
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ambientes

Los experimentos se establecieron en la zona lacustre de la Cuenca de México; uno el 12 de junio de 2021 en el Rancho Almaraz de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, en Cuautitlán Izcalli (2253 msnm, 19° 41' 48" N y 99° 11' 36" O); el otro el 15 de junio en el Ejido de Santa Úrsula, en Texcoco (2243 msnm, 19° 29' 33" N y 98° 54' 24" O).

### Condiciones climáticas y edáficas

En Cuautitlán Izcalli las normales de precipitación y temperatura media son 647 mm y 15.4°C; durante el experimento fueron 633 mm y 16.6 °C. La evapotranspiración del cultivo estimada en 588 mm no superó la precipitación observada. En Texcoco, las normales son 618 mm y 16.4 °C, los registros durante el experimento fueron 566 mm y 19.2 °C. La evapotranspiración del cultivo fue de 632 mm, superando la precipitación del último mes del ciclo de producción (Figura 1).



**Figura 1.** Histograma de temperatura media diaria; evapotranspiración del cultivo y precipitación observada acumuladas en los ambientes Cuautitlán y Texcoco, 2021.

Los suelos de los dos ambientes son característicos de una zona lacustre; planos, profundos como depósitos de sedimentos finos en su mayoría. En Cuautitlán es franco arcilloso, con alta conductividad hidráulica (3.5 cm/h), capacidad de almacenamiento de agua de 10.4%, presenta baja pedregosidad y buena fertilidad como un efecto residual de las aplicaciones anuales. En Texcoco se presentó suelo migajón arcillo limoso con conductividad hidráulica media en los primeros 40 cm (1.6 cm/h), la capacidad de almacenamiento de agua es de 18.5%, pero presentó bajos contenidos nutrimentales, presencia de arena y pedregosidad de hasta el 7% en el subsuelo por su proximidad al Río Chapingo, además, presentó salinidad que disminuye la disponibilidad de agua.

### Material y diseño experimental

El experimento se conformó con los sitios experimentales Cuautitlán (A1) y Texcoco (A2) como factor ambiente (A); 10 híbridos de maíz de grano blanco (G1-G10) como factor genotipo (G), cinco de ellos generados en la FESC-UNAM y los otros en el CEVAMEX-INIFAP, identificados como genotipos representativos y adaptados a la región agroecológica de los Valles Altos por su potencial productivo, estabilidad en gradientes de disponibilidad de humedad y accesibles para los productores (Tadeo-Robledo *et al.*, 2021; Espinosa-Calderón *et al.*, 2022); riego (H1) y secano (H2) como factor humedad (H) y dos densidades de siembra (D): 55 mil (D1) y 75 mil plantas ha<sup>-1</sup> (D2). El diseño experimental factorial se estableció con bloques completos al azar con tres repeticiones; los 80 tratamientos se conformaron con la combinación de los niveles de los factores 2A x 10G x 2H x 2D. Los tratamientos se aleatorizaron por bloque en unidades experimentales homogéneas (UE), con tamaño de parcela útil de 5 m de longitud y 0.80 m de ancho.

### Labores de manejo

El suelo de la parcela se preparó de forma mecánica, aplicación de fertilizante con boledora, conformación de los surcos en dirección sur-norte y trazo de la regadera en la cabecera de la parcela. La siembra del maíz fue manual, el suelo presentó 7% de humedad (TDR 350 Spectrum), valor inferior al punto de marchitamiento permanente. El ajuste de la densidad de población se realizó a los 30 días después de la siembra.

La dosis única de fertilización profunda fue a partir de fosfato mono amónico (100 kg.ha<sup>-1</sup>) y urea (135 kg.ha<sup>-1</sup>). El control de malezas fue mediante la

aplicación con aguilón de la mezcla de atrazina (2 kg.ha<sup>-1</sup>), S-metolaclor (1 L.ha<sup>-1</sup>) y mesotrione (1.5 L.ha<sup>-1</sup>) previo a la emergencia del cultivo. En los dos sitios se aplicó riego por gravedad en el tratamiento H1 para la germinación (160 mm), debido a que el suelo estaba seco, posteriormente, la precipitación cubrió la demanda hídrica del cultivo, como se aprecia en la figura 1. La presencia de plagas y enfermedades no requirió control pues no fue significativa.

### Respuesta a los tratamientos

La respuesta se determinó con la medición de las variables agronómicas a saber: alturas de planta (AP) y de mazorca (AM) tomadas desde el suelo hasta la primera ramificación de la espiga y hasta el nudo donde se originó la mazorca más alta respectivamente. En la cosecha, se recolectaron todas las mazorcas por unidad experimental para obtener el peso completo (PC). De éstas, se tomó una muestra de cinco mazorcas al azar para analizarlas en laboratorio.

Las variables de las mazorcas fueron longitud (LM), diámetro (DM) y diámetro de olote (DO) obtenidos con vernier, número de hileras (HM) y número de granos por hileras (GH) por conteo manual. El peso de 200 granos (PDG) se identificó con balanza, el peso volumétrico del grano (PV) y el porcentaje de humedad (%H) se midieron con el aparato StentLite DICKEY-Jhon modelo GAC 2100.

El rendimiento de grano (RG) se calculó con la fórmula  $RG = (PC * MS * \%G * FC) / 8600$ . Donde; PC= peso de las mazorcas cosechadas en la UE, en kg; MS= porcentaje de materia seca, se determinó restando el contenido de humedad al peso del grano húmedo (%H); %G= porcentaje de grano, se obtuvo pesando el grano de las cinco mazorcas desgranadas y relacionándolo con el peso de las mazorcas con olote; FC= factor de conversión, se determinó con el cociente de la superficie de una hectárea entre el tamaño de la UE en m<sup>2</sup>; 8600= constante para estimar el rendimiento con humedad del 14% (Alonso-Sánchez *et al.*, 2022).

El uso del agua (UA) se determinó con la fórmula  $UA = RG / L$ . Donde; RG= rendimiento de grano en kg, y L= lámina de agua de riego más precipitación que ingresó en cada tratamiento, en milímetros (Alonso-Sánchez *et al.*, 2020).

El análisis de varianza (ANDEVA) del experimento factorial se realizó a partir del modelo lineal aditivo que describe Montgomery (2022) para los experimentos factoriales. Los supuestos

del modelo fueron verificados en el Software SAS 9.0 (SAS Inc., 2002) empleando las pruebas de Shapiro Wilk para normalidad y la prueba de Bartlett Para homogeneidad de varianzas. Las pruebas de medias e interacciones se realizaron empleando el método de Tukey ( $p < 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el factor ambiente se encontraron efectos en todas las variables evaluadas ( $p < 0.01$ ). El factor genotipo mostró efecto para algunas variables ( $p < 0.01$ ), excepto en la AP, AM y PV. En el factor humedad se encontró efecto para las variables rendimiento y granos por mazorca ( $p < 0.05$ ), así como para AM, DM y DO ( $p < 0.01$ ). El factor densidad de población presentó efectos en DM y GM ( $p < 0.05$ ) y HM ( $p < 0.01$ ) (Tabla 1).

Las interacciones sólo fueron de primer orden, a mencionar; AxG para hileras por mazorca; AxH para altura de planta y mazorca, diámetro de mazorca, peso volumétrico, rendimiento y uso del agua; GxH para diámetro e hileras por mazorca y HxD para longitud y diámetro de mazorca, granos por hilera y rendimiento. La humedad tuvo interacción con los otros tres factores, lo que da evidencia de lo determinante que es la disponibilidad del agua sobre las variables respuestas de los cultivos (Azcón y Bieto, 2008; Castellanos *et al.*, 2019).

Las medias generales fueron menores a las que reportaron Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018) y Vázquez-Carrillo *et al.* (2020) para híbridos en los Valles Altos bajo punta de riego; los valores inferiores fueron posible respuesta al efecto de la humedad aportada por el secano. Los coeficientes de variación fueron aceptables y representaron la heterogeneidad del suelo como lo reportan Flores-Román *et al.* (1981) para Cuautitlán y Govaerts *et al.* (2008) para Texcoco.

### Comparación de medias de las variables con efecto simple

En el caso del factor ambiente se presentaron diferencias estadísticas para longitud de mazorca, granos por hilera y granos por mazorca; en Cuautitlán se presentaron las medias superiores (14.5 cm, 31.7 granos y 507 granos por mazorca) respecto a Texcoco (13.15 cm, 28.12 granos y 403 granos por mazorca). Los resultados son similares a los que reportan Alonso-Sánchez *et al.* (2022) y Martínez-Díaz *et al.* (2024) para híbridos establecidos en la Cuenca de México donde sobresale la zona de Cuautitlán, pues en este ambiente el suelo presenta mayor fertilidad respecto al de Texcoco, lo cual justifica estos resultados.

**Tabla 1. Cuadrados medios y significancia de las variables respuesta de diez genotipos de maíz bajo riego y secano con dos densidades de siembra en dos ambientes de Valles Altos de México en el ciclo primavera-verano, 2021.**

F.V.	VARIABLES											
	RG	AP	AM	LM	DM	DO	HM	GH	GM	PDG	PV	UA
AMB (A)	1199**	15561**	11830**	115**	14.7**	0.2**	158**	785**	639015**	25938**	5014**	1766**
GEN (G)	19.5**	543.25	367.86	5.6**	0.2**	0.1**	3.2**	39.7**	7518**	222**	17.19	45.1**
HUM (H)	10.7*	870.2	2375**	1.35	0.4**	0.04	0.5	52.2*	15585*	1046**	504**	124**
DEN (D)	0.02	319.7	7.7	0.81	0.2*	0.008	7.7**	12.15	19693*	55.1	31.1	0.91
AxG	4.15	219.35	375.66	2.75	0.09	0.025	2.2*	6.7	4181	72.9*	6.06	8.94
AxH	39.9**	47461**	30578**	6.01	0.3**	0.1*	0.2	12.15	614.4	549**	623**	270**
AxD	0.27	1545.33	124.7	2.81	0.07	0.1*	0.9	3.26	1075.26	15.5	3.31	1.04
GxH	2.62	335.83	213.94	1.74	0.1*	0.03	3.4**	3.54	2372.08	58.5	17.9	8.7
GxD	2.76	250.81	122.32	2.15	0.05	0.02	1.63	10.44	4054.08	18.23	6.94	6.28
HxD	21.7*	2633.43	624.03	8.8*	0.24*	0.06	0.004	43.3*	8425.35	262**	11.18	53.8**
AxGxH	4.88	407.49	244.47	0.95	0.03	0.01	1.05	5.2	1927.98	28.55	11.69	12.97
AxGxD	1.16	446.44	80.12	3.21	0.05	0.03	0.62	9.89	3303.36	49.15	24.7*	2.78
AxHxD	3.92	90.03	8.43	0.15	0.003	0.08	0.2	0.26	299.26	13.53	39.36	12.6
GxHxD	2.16	218.64	163.47	1.41	0.07	0.01	1.09	8.59	2606.22	35.59	19.57	5.41
AxGxHxD	2.9	238.09	106.26	0.91	0.04	0.01	0.72	7.35	1988.2	29.03	14.86	7.51
MEDIA	7.18	211.56	99.08	13.84	4.3	2.52	15.14	29.93	455.04	49.87	73.11	10.69
CV	22.8	12.39	17.54	10.77	5.47	5.95	6.92	10.4	13.47	11.14	4.77	23.4

\* $p \leq 0.05$ ; \*\* $p \leq 0.01$ ; RG= rendimiento de grano; AP= altura de planta; AM= altura de mazorca; LM= longitud de mazorca; DM= diámetro de mazorca; DO: diámetro de olote; HM= hileras por mazorca; GH= granos por hilera; GM= granos por mazorca; PDG= peso de 200 granos; PV= peso volumétrico; UA= uso del agua; AMB=factor ambiente; GEN= factor genotipo; HUM= factor humedad; DEN= factor densidad.

La comparación de medias para el factor híbrido definió tres grupos de similitud, el rendimiento superior lo presentó el híbrido experimental (IA249AE x FSN 87) x GNF, con un rendimiento de grano de 8.94 t.ha<sup>-1</sup>, en segundo lugar y mismo grupo de significancia se ubicó el híbrido (IA249AE x FSN 87) x IA449RMIA44, con un rendimiento de 8.38 t.ha<sup>-1</sup>. En contraste, el menor rendimiento correspondió al híbrido Tlaoli PUMA, con 6.35 t.ha<sup>-1</sup>, en el tercer grupo de significancia (Tabla 2). Lo anterior es importante, porque tres híbridos mostraron rendimiento superior a Tlaoli Puma, que es un híbrido comercial registrado por la UNAM, ante el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV).

Entre el híbrido de mejor rendimiento de grano y Tlaoli Puma se presentó una diferencia de 2.59 t.ha<sup>-1</sup>; la longitud de mazorca de 15 y 13 cm; el número de granos por hilera con 32 y 29 granos; el número de granos por mazorca fueron 491 y 434 granos; la longitud de mazorca, el número de granos por hilera y granos por mazorca se correlacionan de forma positiva con el rendimiento como lo reportaron López-López *et al.* (2017); el aprovechamiento del agua resultó con 13.35 y 9.35 kilogramos de grano por cada milímetro de agua total. En este caso, el resultado es congruente con el rendimiento de los híbridos, pues el uso del agua

está en relación directa con la producción de grano (Alonso-Sánchez *et al.*, 2020). Los híbridos experimentales mostraron rendimiento superior con relación a los convencionales como lo reportaron Tadeo-Robledo *et al.* (2022) y Espinosa-Calderón *et al.* (2022). Es importante destacar que en los programas de mejoramiento se busca que los nuevos híbridos sean superiores respecto a los actuales (López-López *et al.*, 2021).

### Interacción Ambiente con Genotipo (A x G)

La interacción de los factores ambiente con genotipo (A x G) mostró efecto significativo en dos variables (Tabla 3), el número de hileras por mazorca, donde los híbridos resultaron con los valores superiores en Cuautitlán respecto a Texcoco; el híbrido (IA424 F x IA249) x MIA46 fue el de número mayor con 16.7 hileras en Cuautitlán, en cambio, el híbrido (IA249AE x FSN 87) x MIA46 en Texcoco resultó con el menor número (13.4). El peso de 200 granos también presentó valores superiores en Cuautitlán con el híbrido (IA249AE x FSN 87) x IA449RMIA44 que presentó 64.9 g, en cambio, el híbrido (IA424 F x IA249) x MIA46 mostró el valor menor de 35 g en Texcoco. El efecto de sitio que también reportaron Zamudio *et al.* (2018) se presentó en la interacción

**Tabla 2. Comparación de medias de las variables sin efecto de interacción para el factor ambiente y el factor genotipo en el ciclo primavera-verano 2021.**

Fuente de variación	VARIABLES					
	RG (t.ha <sup>-1</sup> )	LM (cm)	GH	DO (cm)	GM	UA (kg.mm <sup>-1</sup> )
<b>AMBIENTE</b>						
Cuautitlán	9.42a <sup>#</sup>	14.53a	31.74a	2.54a <sup>#</sup>	506.64a	13.40a <sup>#</sup>
Texcoco	4.95b <sup>#</sup>	13.15b	28.12b	2.49b <sup>#</sup>	403.44b	7.98b <sup>#</sup>
DSH	0.41	0.36	0.79	0.03	15.66	0.64
<b>GENOTIPO</b>						
(IA424 F x IA249) x MIA46	7.05 <sup>bc</sup>	13.41 <sup>b</sup>	29.25 <sup>ac</sup>	2.54 <sup>ac</sup>	455.25 <sup>ab</sup>	10.56 <sup>bc</sup>
(IA446 F x IA442) x MIA46	6.4 <sup>c</sup>	13.62 <sup>ab</sup>	29.29 <sup>ac</sup>	2.52 <sup>ac</sup>	442.17 <sup>ab</sup>	9.56 <sup>c</sup>
(IA424 F x IA249) x MIA45	7.65 <sup>ac</sup>	13.91 <sup>ab</sup>	29.37 <sup>ac</sup>	2.52 <sup>ac</sup>	464.67 <sup>ab</sup>	11.33 <sup>bc</sup>
(IA446 F x IA442) x MIA45	6.5 <sup>c</sup>	13.75 <sup>ab</sup>	29.12 <sup>bc</sup>	2.49 <sup>bc</sup>	450.50 <sup>ab</sup>	9.65 <sup>c</sup>
TLAOLI PUMA	6.35 <sup>c</sup>	13.29 <sup>b</sup>	28.79 <sup>c</sup>	2.53 <sup>ac</sup>	434.13 <sup>b</sup>	9.35 <sup>c</sup>
(IA249AE x FSN 87) x IA449RMIA44	8.38 <sup>ab</sup>	13.41 <sup>b</sup>	28.95 <sup>bc</sup>	2.49 <sup>bc</sup>	443.67 <sup>ab</sup>	12.56 <sup>ab</sup>
(IA249AE x FSN 87) x MIA47	7.28 <sup>bc</sup>	13.75 <sup>ab</sup>	29.25 <sup>ac</sup>	2.41 <sup>c</sup>	438.83 <sup>ab</sup>	10.83 <sup>bc</sup>
(IA249AE x FSN 87) x MIA46	6.92 <sup>bc</sup>	14.08 <sup>ab</sup>	31.37 <sup>ac</sup>	2.47 <sup>bc</sup>	454.96 <sup>ab</sup>	10.26 <sup>bc</sup>
(IA249AE x FSN 87) x GNF	8.94 <sup>a</sup>	14.91 <sup>a</sup>	32.12 <sup>a</sup>	2.55 <sup>ab</sup>	491.00 <sup>a</sup>	13.35 <sup>a</sup>
(IA446 F x IA442) x MIXIM	6.35 <sup>c</sup>	14.25 <sup>ab</sup>	31.79 <sup>ab</sup>	2.65 <sup>a</sup>	475.67 <sup>ab</sup>	9.46 <sup>c</sup>
DSH	1.52	1.38	2.88	0.13	56.8	2.32

RG= rendimiento de grano; LM= longitud de mazorca; GH= granos por hilera; DO=diámetro de olote; GM= granos por mazorca, UA=Uso del agua; DSH= diferencia significativa honesta; #=presentó interacción significativa. Las medias con la misma letra dentro de las columnas de las variables observadas para cada factor (ambiente y genotipo) son iguales estadísticamente (Tukey,  $p < 0.05$ ).

**Tabla 3. Comparación de medias de la interacción de los factores: híbridos de maíz con ambiente e híbridos de maíz con humedad en el ciclo primavera-verano 2021.**

Factores	Ambiente				Humedad			
	Cuautitlán HM	Texcoco	Cuautitlán PDG (g)	Texcoco	Riego	Secano DM (cm)	Riego	Secano HM
(IA424 F x IA249) x MIA46	16.25 <sup>ab</sup>	14.83 <sup>bg</sup>	61.66 <sup>a</sup>	35.00 <sup>d</sup>	4.25 <sup>ac</sup>	4.36 <sup>ac</sup>	15.83 <sup>ab</sup>	15.25 <sup>ac</sup>
(IA446 F x IA442) x MIA46	15.91 <sup>ad</sup>	14.33 <sup>eg</sup>	58.75 <sup>ab</sup>	39.08 <sup>cd</sup>	4.20 <sup>ac</sup>	4.28 <sup>ac</sup>	15.00 <sup>ac</sup>	15.25 <sup>ac</sup>
(IA424 F x IA249) x MIA45	16.75 <sup>a</sup>	14.75 <sup>cg</sup>	62.75 <sup>a</sup>	39.50 <sup>cd</sup>	4.40 <sup>ab</sup>	4.12 <sup>bc</sup>	16.41 <sup>a</sup>	15.08 <sup>ac</sup>
(IA446 F x IA442) x MIA45	16.25 <sup>ab</sup>	14.33 <sup>eg</sup>	61.00 <sup>ab</sup>	40.25 <sup>cd</sup>	4.30 <sup>ac</sup>	4.23 <sup>ac</sup>	14.83 <sup>bc</sup>	15.75 <sup>ab</sup>
TLAOLI PUMA	16.25 <sup>ab</sup>	13.83 <sup>fg</sup>	64.83 <sup>a</sup>	43.33 <sup>c</sup>	4.51 <sup>a</sup>	4.27 <sup>ac</sup>	15.16 <sup>ac</sup>	14.91 <sup>bc</sup>
(IA24AE x FS87) x IA449RMIA44	15.25 <sup>bf</sup>	14.75 <sup>cg</sup>	64.91 <sup>a</sup>	43.16 <sup>c</sup>	4.40 <sup>ab</sup>	4.45 <sup>ab</sup>	15.16 <sup>ac</sup>	14.83 <sup>bc</sup>
(IA249AE x FSN 87) x MIA47	15.58 <sup>ac</sup>	14.58 <sup>dg</sup>	59.08 <sup>ab</sup>	40.00 <sup>cd</sup>	4.29 <sup>ac</sup>	4.17 <sup>bc</sup>	14.75 <sup>bc</sup>	15.41 <sup>ab</sup>
(IA249AE x FSN 87) x MIA46	15.33 <sup>ac</sup>	13.41 <sup>g</sup>	53.08 <sup>b</sup>	38.08 <sup>cd</sup>	4.24 <sup>ac</sup>	4.05 <sup>c</sup>	14.83 <sup>bc</sup>	13.91 <sup>c</sup>
(IA249AE x FSN 87) x GNF	15.83 <sup>ad</sup>	14.66 <sup>dg</sup>	63.33 <sup>a</sup>	39.41 <sup>cd</sup>	4.44 <sup>ab</sup>	4.43 <sup>ab</sup>	14.83 <sup>bc</sup>	15.66 <sup>ab</sup>
(IA446 F x IA442) x MIXIM	16.16 <sup>ac</sup>	13.83 <sup>fg</sup>	53.33 <sup>b</sup>	37.00 <sup>cd</sup>	4.39 <sup>ab</sup>	4.23 <sup>ac</sup>	15.08 <sup>ac</sup>	14.91 <sup>bc</sup>
DSH	1.48		7.99		0.32		1.48	

HM=hileras por mazorca; PDG= peso de 200 granos; DM= diámetro de mazorca; HM= hileras por mazorca; DSH= diferencia significativa honesta. Las medias con la misma letra dentro del par de columnas de cada variable respuesta son iguales estadísticamente (Tukey,  $p < 0.05$ ).

ambiente con genotipo, los híbridos mostraron respuesta diferencial en estas dos variables, lo que se relaciona con las características fisicoquímicas del suelo a favor de Cuautitlán, donde se presentaron más hileras por mazorca y granos con peso mayor. Otros híbridos similares también han mostrado esta respuesta de interacción en las características de la mazorca, como en el estudio de Martínez-Gutiérrez *et al.* (2018) con híbridos de Valles Altos.

#### Interacción genotipo con humedad (G x H)

La interacción de los factores genotipo con el régimen de humedad (G x H) mostró respuesta significativa en el diámetro y número de hileras de la mazorca (Tabla 3). El híbrido Tlaoli PUMA mostró el diámetro mayor en condiciones de riego con 4.51 cm; el híbrido (IA249AE x FSN 87) x MIA46 presentó el diámetro menor de 4.05 cm en condiciones de secano; posiblemente el diámetro se relacionó con la disponibilidad de humedad y es una variable en relación inversa con el rendimiento ya que, Tlaoli PUMA presentó la media general menor de rendimiento con 6.35 t.ha<sup>-1</sup>. Por otro lado, el híbrido (IA424 F x IA249) x MIA45 en

condiciones de riego presentó el número mayor de hileras por mazorca con promedio de 16.4 hileras, en cambio (IA249AE x FSN 87) x MIA46 en secano presentó el número promedio menor de 13.9 hileras. Se observó que el riego interaccionó positivamente con los híbridos para estas dos variables, pues Castellanos *et al.* (2019) reportaron que la disponibilidad de humedad mejora estas características de la mazorca, pero estos híbridos no produjeron los rendimientos ni uso del agua superiores.

Los genotipos (IA446 F x IA442) x MIA45, (IA249AE x FSN 87) x MIA47 y (IA249AE x FSN 87) x GNF presentaron número superior de hilera y con diferencia significativa en secano con respecto al riego; puede explicarse como una respuesta de adaptación de los materiales genéticos a condiciones adversas como lo mencionan López-López *et al.* (2021). El número de hileras por mazorca presentó efecto de la interacción A x G y G x H; como factor común se presentó el genotipo y en ambos casos el híbrido (IA424 F x IA249) x MIA45 presentó la media mayor con 16.7 y 16.4 hileras respectivamente. El ambiente y la

disponibilidad de humedad insertan respuesta en el número de hileras de la mazorca de los híbridos (Castellanos *et al.*, 2019); esta variable tiene relación directa con el rendimiento.

Las hileras por mazorca y peso de doscientos granos de todos los híbridos fueron superiores en el ambiente de Cuautitlán, pero el diámetro de mazorca de los híbridos fue mayor en secano para (IA424 F x IA249) x MIA46, (IA446 F x IA442) x MIA46 y (IA249AE x FSN 87) x IA449RMIA44; así también, las hileras por mazorca fueron mayores bajo secano para (IA446 F x IA442) x MIA46, (IA249AE x FSN 87) x MIA47 y (IA249AE x FSN 87) x GNF y contrasta con lo que reportaron Castellanos *et al.* (2019) para la determinación del número de hileras en maíz. El sistema de producción en secano posiblemente tiene alto potencial productivo en Valles Altos en sitios con características similares a las de Cuautitlán, como también lo refieren Alonso-Sánchez *et al.* (2022); esta forma de producción bajo secano representa alta sostenibilidad en términos del recurso agua.

#### Interacción ambiente con humedad (A x H)

La interacción del ambiente con la humedad (A x H) mostró valores máximos en Cuautitlán bajo secano y los mínimos en Texcoco bajo secano para las variables que contiene la Tabla 4. El exceso de agua en Cuautitlán afectó la morfología del maíz y con ello el rendimiento; la respuesta se relaciona con las propiedades del suelo cuando se sobrepasa la capacidad de campo, pues en este ambiente un día después del riego se presentaron eventos intensos de lluvia; en cambio, en ese mismo sitio la humedad por secano fue más favorable, que sumado a la fertilidad del suelo, propiciaron

valores mayores de interacción para alturas, diámetros, peso volumétrico, rendimiento y uso del agua. La respuesta favorable del maíz bajo secano en Cuautitlán también la reportaron Canales-Islas *et al.*, (2024) y Martínez-Díaz *et al.*, (2024) en híbridos PUMA e INIFAP. Por otro lado, los valores mínimos en Texcoco bajo secano se asocian con la baja fertilidad y el estrés que el déficit de agua genera en intervalos de tiempo donde no llueve, dado que el suelo tiene baja capacidad de almacenamiento debajo de los 40 cm por lo que, aunque llueva de forma regular, los excesos se drenan.

La diferencia de los rendimientos extremos entre ambientes fue de 5.28 t.ha<sup>-1</sup> y se presentó para la humedad de secano con sólo 24 mm de diferencia en la precipitación entre ambientes; se atribuye la respuesta a la diferencia de fertilidad y propiedades del suelo, como también lo reportaron Martínez-Díaz *et al.*, (2024). El uso del agua en relación directa al rendimiento presentó diferencia de 7.5 kg·mm<sup>-1</sup> y el uso mayor se presentó en Cuautitlán bajo secano (15.19 kg·mm<sup>-1</sup>); este resultado coincidió con lo que reportaron Alonso-Sánchez *et al.* (2022) quienes indicaron que el mejor uso del agua en híbridos de maíz se presentó bajo secano; la razón es que esta variable presenta una respuesta diferencial no lineal para los gradientes de disponibilidad de humedad por lo que existe un uso máximo para una cantidad óptima de agua; matemáticamente corresponde con el valor de la pendiente máxima de una función que relaciona el rendimiento y la cantidad de agua total utilizada. El riego en Texcoco no incrementó ni un kilogramo el uso del agua por cada milímetro de lámina adicional por lo que la extracción de agua del acuífero para riego no fue productiva.

**Tabla 4. Comparación de medias de la interacción de los factores ambiente con humedad en el ciclo primavera-otoño 2021.**

AMBIENTE	HUMEDAD							
	Variables respuesta							
	RIEGO	SECANO	RIEGO	SECANO	RIEGO	SECANO	RIEGO	SECANO
	AP (cm)		AM (cm)		DM (cm)		DO (cm)	
Cuautitlán	203.65 <sup>c</sup>	235.58 <sup>a</sup>	97.97 <sup>c</sup>	114.25 <sup>a</sup>	4.55 <sup>a</sup>	4.55 <sup>a</sup>	4.56 <sup>a</sup>	4.54 <sup>a</sup>
Texcoco	215.67 <sup>b</sup>	191.35 <sup>d</sup>	106.50 <sup>b</sup>	77.63 <sup>d</sup>	4.14 <sup>b</sup>	3.97 <sup>c</sup>	4.14 <sup>b</sup>	4.00 <sup>b</sup>
DSH	10.97		7.41		0.106		0.069	
	PV (kg.h <sup>l</sup> <sup>-1</sup> )		PDG (g)		RG (t.ha <sup>-1</sup> )		UA (kg.mm <sup>-1</sup> )	
Cuautitlán	77.52 <sup>a</sup>	77.85 <sup>a</sup>	60.85 <sup>a</sup>	59.70 <sup>a</sup>	9.22 <sup>a</sup>	9.61 <sup>a</sup>	11.62 <sup>b</sup>	15.19 <sup>a</sup>
Texcoco	71.60 <sup>b</sup>	65.48 <sup>b</sup>	43.08 <sup>b</sup>	35.88 <sup>c</sup>	5.57 <sup>b</sup>	4.33 <sup>c</sup>	8.32 <sup>c</sup>	7.64 <sup>c</sup>
DSH	1.7		7.99		0.77		1.19	

AP=altura de planta; AM= altura de mazorca; DM= diámetro de mazorca; DO= diámetro de olote; PV= peso volumétrico, PDG=peso de 200 granos; RG= rendimiento de grano; UA= uso del agua; DSH= diferencia significativa honesta. Las medias con la misma letra dentro del par de columnas de cada variable respuesta son iguales estadísticamente (Tukey,  $p < 0.05$ ).

### Interacción ambiente con densidad (A x D)

La interacción del ambiente con la densidad de población sólo mostró efecto significativo en el diámetro de olote, el valor superior se presentó en Cuautitlán con la densidad de 75 mil plantas ha<sup>-1</sup> y presentó 2.56 cm y el valor inferior se presentó en Texcoco para 75 mil plantas ha<sup>-1</sup> (2.46 cm). La densidad de 55 mil plantas ha<sup>-1</sup> presentó 2.53 cm en los dos ambientes sin diferencia estadística pues la Diferencia Significativa Honesta fue de 0.06.

El diámetro de olote mostró efecto significativo de la interacción A x H y A x D; el factor común fue el ambiente y en ambos casos la media resultó superior en el ambiente de Cuautitlán con 2.56 cm. La respuesta coincide con el ambiente que presentó las mejores condiciones de fertilidad del suelo.

### Interacción humedad con densidad (H x D)

La interacción de la humedad con la densidad (HxD), que se presenta en la Tabla 5, presentó efecto estadístico ( $p < 0.05$ ). La combinación riego con 75 mil plantas ha<sup>-1</sup> mostraron valores superiores en algunas variables: el diámetro de mazorca con 4.34 cm, el número de granos por hilera con 30.6 granos, el peso de 200 granos de 52.53 g y el rendimiento de grano de 7.69 t.ha<sup>-1</sup>. En cambio, el uso del agua fue superior en secano para 55 mil plantas ha<sup>-1</sup>, con 11.95 kg.mm<sup>-1</sup>; secano rindió menos, pero relativamente con cantidad de agua menor lo que incrementó el uso del agua. Los valores más bajos de la interacción se presentaron para condiciones de secano con 75 mil plantas ha<sup>-1</sup>, excepto el uso del agua que fue inferior para riego con 55 mil plantas ha<sup>-1</sup>. Los resultados anteriores muestran la importancia del riego a medida que se incrementa la densidad, pues cuando se dispone

menos agua, como en casos de secano y si la densidad se incrementa, resulta contraproducente por la competencia entre plantas. La densidad se incrementa a medida que se dispone de más recursos como el agua y nutrientes en el suelo (Zamudio *et al.*, 2018, Martínez-Díaz *et al.*, 2024).

### Interacciones múltiples

El diámetro de mazorca respondió a las interacciones simples A x H, G x H y H x D, como factor común se identificó la humedad. En los tres casos la humedad (riego) insertó efecto positivo en las medias de esta variable.

El peso de 200 granos respondió a las interacciones A x G, A x H, y H x D; en las dos primeras el factor común fue el ambiente donde Cuautitlán resultó con superioridad sobre Texcoco con 61.66 y 60.85 g respectivamente; en las dos segundas el factor común fue la humedad donde el tratamiento de riego insertó efecto positivo con 60.85 y 52.53 g respectivamente. La fertilidad de Cuautitlán y la disponibilidad de agua por el factor humedad (riego) mejoraron el peso de 200 granos, que se relaciona con el tamaño mayor de grano como lo indican Vázquez-Carrillo *et al.* (2020).

El rendimiento de grano y el uso del agua mostraron respuesta significativa a las interacciones AxH y HxD; el factor común fue la humedad. El rendimiento de grano para secano en Cuautitlán presentó 9.61 t.ha<sup>-1</sup>, pero en la interacción de la humedad con la densidad, fue el riego con la densidad mayor los que produjeron el rendimiento mayor con 7.69 t.ha<sup>-1</sup>; la respuesta al riego se relaciona con el efecto del ambiente y con

**Tabla 5. Comparación de medias de la interacción de los factores humedad con densidad en el ciclo primavera-otoño 2021.**

	D1	D2	D1	D2	D1	D2
	LM (cm)		DM (cm)		GH	
RIEGO	13.78 <sup>a</sup>	14.05 <sup>a</sup>	4.34 <sup>a</sup>	4.34 <sup>a</sup>	30.20 <sup>ab</sup>	30.60 <sup>a</sup>
SECANO	14.01 <sup>a</sup>	13.51 <sup>a</sup>	4.32 <sup>a</sup>	4.20 <sup>b</sup>	30.11 <sup>ab</sup>	28.81 <sup>b</sup>
DSH	0.64		0.1		1.43	
	PDG (g)		RG (t.ha <sup>-1</sup> )		UA (kg.mm <sup>-1</sup> )	
RIEGO	51.40 <sup>ab</sup>	52.53 <sup>a</sup>	7.10 <sup>ab</sup>	7.69 <sup>a</sup>	9.56 <sup>c</sup>	10.38 <sup>bc</sup>
SECANO	49.31 <sup>b</sup>	46.26 <sup>c</sup>	7.28 <sup>ab</sup>	6.66 <sup>b</sup>	11.95 <sup>a</sup>	10.88 <sup>ab</sup>
DSH	2.59		0.77		1.19	

D1=densidad de 55 mil plantas por hectárea; D2= densidad de 75 mil plantas por hectárea; LM= longitud de mazorca; DM= diámetro de mazorca; GH= granos por hilera; PDG= peso de 200 granos; RG= rendimiento de grano; UA= uso del agua; DSH= diferencia significativa honesta. Las medias con la misma letra dentro del par de columnas de cada variable respuesta son iguales estadísticamente (Tukey,  $p < 0.05$ ).

el manejo de la densidad (Alonso-Sánchez *et al.*, 2020). El uso del agua fue mayor bajo secano en Cuautitlán ( $15.19 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) y secano con 55 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$  ( $11.95 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}$ ); con cantidad menor de agua se presentó uso del agua mayor, aunque se reduce el rendimiento de grano de forma no proporcional a la cantidad de agua.

## CONCLUSIONES

El rendimiento y uso del agua de los híbridos de maíz presentaron efecto significativo de la interacción del manejo de humedad con el ambiente y manejo de humedad con la densidad de siembra. El ambiente de Cuautitlán bajo secano produjo 3.6 kg más de grano por cada milímetro de agua, lo que permitió un ahorro de agua de 160 mm, ya que no fue necesario el uso de recursos hídricos para riego. Además, el manejo bajo secano sobresalió con la densidad de siembra de 55 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$ , generando 1.1 kg más grano por cada milímetro de agua. La producción bajo secano es sostenible, en términos del recurso agua para condiciones similares a las de este trabajo, ya que conduce al uso eficiente del agua y por lo tanto a la seguridad hídrica en las condiciones de sequía que actualmente se presentan en los Valles Altos de México.

En Cuautitlán no se recomienda riego ya que, bajo secano, con un régimen distribuido de lluvia a lo largo del ciclo del cultivo y con capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, los híbridos de maíz produjeron  $0.4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  más que bajo riego; por lo contrario, por exceso de agua de lluvia después del riego, éste resultó contraproducente. En cambio, en Texcoco por las condiciones agroecológicas, el riego resultó más productivo que bajo secano.

La densidad de siembra se recomienda de 55 mil plantas por hectárea cuando los recursos hídricos son limitados, pero el suelo es fértil; en cambio, se recomienda la densidad de 75 mil plantas por hectárea cuando se dispone de agua para riego.

Los híbridos nuevos de maíz que genera la UNAM y el INIFAP presentaron rendimiento y uso del agua estadísticamente superior al híbrido TLAOLI PUMA, por lo tanto, tienen potencial productivo en las condiciones agroecológicas similares a las de este estudio, y son una alternativa accesible para los productores, lo que contribuye a la seguridad hídrica y alimentaria del País bajo escenarios con posible efecto del cambio climático.

## Agradecimientos

A los investigadores Ramón Arteaga Ramírez y Gustavo Mancera Mercado por la disponibilidad de información meteorológica detallada. Este trabajo fue parte del del programa de apoyo de la UNAM a proyectos de investigación e innovación tecnológica PAPIIT IA105122 y de forma colateral los proyectos PAPIIT IT200121 y PICI C12460. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM.

**Funding:** The work funded with resources from the UNAM program PAPIIT IA105122.

**Conflict of interest:** The authors have no conflict of interest to declare.

**Compliance with ethical standards:** The work does not require approval by an ethical committee.

**Data availability:** Data are available upon reasonable request with the corresponding author ([alonso\\_m77@hotmail.com](mailto:alonso_m77@hotmail.com))

**Author contribution statement (CRediT):** **H. Alonso-Sánchez-** Conceptualization, Data curation, Data analysis, Investigation, Methodology, Writing; **M. Tadeo-Robledo-** Conceptualization, Investigation, supervision, writing; **A. Espinosa-Calderón-** Conceptualization, Data curation, Data Analysis, Investigation, Supervision, Writing; **C. López-López-** Investigation, Supervision, Writing. **J. Zaragoza-Esparza-** Investigation, supervisión, resources; **A. Turrent-Fernández-** Conceptualization, Investigation, Supervisión; **K.Y. Mora-García-** Investigation, resources.

## REFERENCES

- Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zaragoza-Esparza, J. and López-López, C., 2020. Productividad del agua y rendimiento de maíz bajo diferente disponibilidad de humedad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, pp, 1005-1016. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2118>
- Alonso-Sánchez, H., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zamudio-González, B., Zaragoza-Esparza, J. and López-López, C., 2022. Water and agronomic evaluation of maize hybrids in response to different environments and nitrogen doses. *Agrociencia*, 56, pp, 1-12.

- <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i1.2698>
- Arellano-Vázquez, J. L., Juan-Virgen, J.V., Rojas-Martínez, I. and Ávila-Perches, M. A., 2011. H-70: Híbrido de maíz de alto rendimiento para temporal y riego del Altiplano Central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), pp, 619-626. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1651>
- Azcón-Bieto and Talón, 2008. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Segunda Edición. Barcelona, España. McGraw-Hill. 669 p.
- Baohua, L., Xinping, Ch., Qingfeng, M., Haishun, Y. and Justin van, W., 2017. Estimating maize yield potential and yield gap with agro-climatic zones in China-Distinguish irrigated and rainfed conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, pp, 108-117. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.agrformet.2017.02.035>
- Borroel-García, V. J., Salas-Pérez, L., Ramírez-Aragón, M. G., López-Martínez, J. D. and Lun-Anguiano, J., 2018. Rendimiento y componentes de producción de híbridos de maíz en la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 36(4), pp, 423-429. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.281>
- Canales-Islas, E., López-López, C., Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Turrent-Fernández, A. y Zamudio-González, B. 2024. Productividad y estabilidad de variedades de polinización libre en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(6), pp, 1-10. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3032>
- Castellanos, J. Z., Etchevers, B. J., Peña, D. M., García, H. S., Ortiz-Monasterio, I., Arango, G. A., Macías, C. J. and Venegas, V. C., 2019. Cómo Crece y se Nutre una Planta de Maíz. Guanajuato, México. Fertilab. 124 p.
- Damián-Huato, M. A., Cruz-León, A., Ramírez-Valverde, B., Romero-Arenas, O., Moreno-Limón, S. and Reyes-Muro, L., 2013. Maíz, alimentación y productividad: modelo tecnológico para productores de temporal de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10 (2), pp, 157-176. <https://revista-asyd.org/index.php/asyd/article/view/1133/470>
- Espinosa, C. A., Tadeo, R. M., Zamudio, G. B., Virgen, V. J., Turrent, F. A., Rojas, M. I., Gómez, M. N. O., Sierra, M. M., López, L. C., Palafox, C. A., Vázquez, C. G., Rodríguez, M. F., Canales, I. E., Zaragoza, E. J., Martínez, Y. B., Valdivia, B. R., Cárdenas, M. A., Mora, G. K. and Martínez, N. B., 2018. H-47 AE, híbrido de maíz para Valles Altos de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 1(41), pp, 87-89. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>
- Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Zamudio-González, B., Turrent-Fernández, A., Gómez-Montiel, N., and Sierra-Macias, M., 2022. H 49 AE: híbrido de maíz para Valles Altos de México con androesterilidad para producción de semillas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13 (7), pp, 1333-1338. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.1768>
- Flores-López, H. E., Ruíz-Corral, J. A., De la Mora-Orozco, C., Zarazua-Villaseñor, P., Chávez-Durán, A. A., Ramírez-Vega, H. and Velázquez-Valle, M. A., 2014. Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano en maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10, pp, 2007-2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i10.1040>
- Flores-Román, D., Aguilera-Herrera, N. and Flores-Delgadillo, L., 1981. Estudio edafológico de los municipios de Cuautitlán, Estado de México. *Revista del Instituto de Geología UNAM*, 5(1), pp, 80-93.
- García-Salazar, J. A., Skaggs, R. K. and Borja-Bravo, M., 2016. Identificación de las regiones productoras de maíz más competitivas en México en la logística y

- el consumo. *Interciencia*, 41(6), pp, 376-381.
- Govaerts, B., Barrera-Franco, M. G., Limón-Ortega, A. Muñoz-Jiménez, P. Sayre, K. D. and Deckers, J., 2008. Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México. *Tropicultura*, 26(1), pp, 2-9.
- Guzmán-Soria, E., Rebollar-Rebollar, S., Hernández-Martínez, J., García-Salazar, J.A, de la Garza-Carranza, M. T., Callejas-Juárez, N. and Terrones-Cordero, A., 2011. La oferta de maíz grano en Guanajuato, México: 1980-2009. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), pp, 857-866.
- López-Hernández, M., Arteaga-Ramírez, R., Ruíz-García, A., Vázquez-Peña, M. A. and López-Rosano, J. I., 2019. Productividad del agua normalizada para el cultivo de maíz (*Zea mays*) en Chapingo, México. *Agrociencia*, 53(6), pp, 811-820.
- López-López, C., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., García, Z. J., Benítez, R. I., Vázquez, C. M. and Carrillo, S. J., 2017. Productividad de cruza simples de maíz con calidad de proteína en Valles Altos de México, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3), pp, 559-570. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3032>
- López-López, C., Tadeo-Robledo, M., García-Zavala, J. J., Espinosa-Calderón, A. and Mejía- Contreras, J. A., 2021. Aptitud combinatoria general y específica de híbridos varietales de maíz amarillo de baja endogamia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), pp, 699-711. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2786>
- Martínez-Díaz, F. S., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Alonso-Sánchez, H., López-López, C. y Zaragoza-Esparza, J. A. 2024. Single parental crosses and trilinear hybrids of maize H-53 AE: densities and productivity. *Tropical And Subtropical Agroecosystems*. 27(83), pp. 1-11. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.5134>
- Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Cardoso-Galvao, J. C., Vázquez-Carrillo, G. and Turrent-Fernández, A., 2018. Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), pp. 1447-1458. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>
- Montgomery, D. C. 2022. Design and Analysis of Experiments. Séptima Edición. EE.UU. John Wiley & Sons Inc.
- Palacios, V. E. and Excebio, G. A., 2020. La Operación de los Sistemas de Riego con Apoyo de las Técnicas de la Información. Colegio de Postgraduados. 311 p.
- SIAP (Servicio de Información Alimentaria y Pesquera), 2023. Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <http://www.siap.gob.mx/> (julio, 2022).
- Tadeo-Robledo, M. Espinosa-Calderón, A., Canales-Islas, E. I., Virgen-Vargas, J., Monter-Santillan, A., Turrent-Fernández, A., Arteaga-Escamilla, I., López-López, C., Gómez-Montiel, N., Sierra-Macias, M., Zaragoza-Esparza, J., Macedo-González, J. J., Valdivia-Bernal, R., Zamudio-González, B., Andrés-Meza, P. and Aguilar-Velázquez, K. E., 2022. Kuautli PUMA: híbrido varietal de maíz de grano amarillo para altitudes de 2200 a 2600 msnm. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 45 (4), pp, 527-529. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.4.527>
- Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zaragoza-Esparza, J., López-López, Consuelo, Canales-Islas, E. I., Zamudio-González, B., Turrent-Fernández, A., Virgen-Vargas, J., Sierra-Macias, M., Gómez-Montiel, N. O., Mora-García, K. Y., Andres-Meza, P. and Cardenas-Marcelo A. L., 2021. Tlaoli PUMA, híbrido de maíz para grano y forraje con androesterilidad y restauración de la fertilidad masculina. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 44(2), pp, 265-267. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.265>

- Vázquez-Carrillo, M. G., Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M. and Turrent-Fernández, A., 2020. Estabilidad de rendimiento y características fisicoquímicas de grano de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(8), pp, 1803-1814. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1990>
- Virgen-Vargas, J., Zepeda-Bautista, R., Ávila-Perches, M. A., Espinosa-Calderón, A., Arellano-Vázquez, J. L. and Gámez-Vázquez, A. J., 2014. Producción de semillas de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción. *Agronomía mesoamericana*, 25(2), pp, 323-335. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v25i2.15439>
- Zamudio G., B., Félix R., A., Martínez G., A., Cardoso G., J. A., Espinosa C., A. and Tadeo R., M., 2018. Producción de híbridos de maíz con urea estabilizada y nutrición foliar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), pp, 1231-1244. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.407>