



Efecto del déficit hídrico en distintas etapas del cultivo de maíz, El Ejido, Los Santos, 2020-2023

Effect of water deficit on different stages of maize, El Ejido, Los Santos, 2020-2023

* Román Gordón Mendoza. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Los Santos, Panamá.

gordon.roman@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8433-2357>

Ana E. Sáez Cigarruista. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Los Santos, Panamá.

ansacig@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4901-7263>

Jorge E. Franco Barrera. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Los Santos, Panamá.

joenfra13@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-0247-411X>

Francisco Ramos Manzané. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Los Santos, Panamá.

franciscoramos2016@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-3203-3069>

Jorge I. Núñez Cano. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Los Santos, Panamá.

jorgenunezcano@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-3417-4791>

*Autor de Correspondencia: gordon.roman@gmail.com

Recibido: 08/04/2025

Aceptado: 12/11/2025

DOI <https://doi.org/10.48204/j.ia.v8n1.a8760>

RESUMEN. Se desarrollo una investigación durante la época seca desde el año 2020 al 2023, con el objetivo de cuantificar el efecto del déficit hídrico en las diferentes etapas fenológicas del cultivo del maíz. El estudio se desarrolló en la Estación Experimental El Ejido-Los Santos. La unidad experimental constó de seis surcos de 5.2 m de largo. Se evaluaron cuatro niveles de estrés en distintas etapas del cultivo y dos híbridos. Para establecer los distintos niveles de deficiencia hídrica, se suspendió el riego por goteo luego de llegar a la fecha indicada hasta finalizar la misma. Los tratamientos tuvieron un arreglo Factorial en Fajas 4 x 2 en un diseño de Bloques Completos al Azar con tres repeticiones. Se calculó la Tasa de crecimiento Relativo y absoluto para cada tratamiento. Las variables climáticas se obtuvieron de una estación meteorológica portátil tipo Davis. El análisis estadístico indicó que hubo diferencias estadísticas altamente significativas para el Factor Etapa de la deficiencia hídrica para casi todas las variables. Se observó que el estrés en el secado de grano (85 a 110 dds) no difirió estadísticamente de las parcelas sin déficit hídrico (riego durante todo el desarrollo del cultivo), estos presentaron rendimientos de grano de 5.32 y 5.24 tha⁻¹, respectivamente. La fase de prefloración fue la menos afectada con una reducción de 26 %. Mientras que, la etapa floración y llenado del grano (50 a 84 dds) fue la más afectada con una reducción del 55 % del rendimiento.

PALABRAS CLAVE: estrés hídrico, tasa absoluta de rendimiento, tasa relativa de crecimiento.

ABSTRACT. A study was conducted during the dry season from 2020 to 2023, with the aim of quantifying the effect of water deficit on the different phenological stages of corn cultivation. The study was carried out at the El Ejido-Los Santos Experimental Station. The experimental unit consisted of six rows 5.2 m long. Four stress levels were evaluated at different stages of the crop and two hybrids. To establish the different levels of water deficiency, drip irrigation was suspended after reaching the indicated date until the end of the same. The treatments had a 4 x 2 Strip Factorial arrangement in a Randomized Complete Block design with three replications. The relative and absolute growth rates were calculated for each treatment. The climatic variables were obtained from a Davis-type portable meteorological station. Statistical analysis indicated highly significant differences for the Water Deficiency Stage Factor for almost all variables. It was observed that grain drying stress (85 to 110 das) did not differ statistically from plots without water deficit (irrigation throughout crop development), which showed grain yields of 5.32 and 5.24 tha⁻¹, respectively. The pre-flowering phase was the least affected, with a 26 % reduction. Meanwhile, the flowering and grain filling stages (50 to 84 das) were the most affected, with a 55 % yield reduction.

KEYWORDS: absolute growth rate, relative growth rate, water stress.



INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cultivos alimentarios más antiguos y de mayor importancia a nivel mundial. Sin embargo, el cambio climático, junto con la creciente incidencia de sequías severas y recurrentes, reduce significativamente la disponibilidad de agua en el suelo. Esta condición de déficit hídrico influye negativamente en el desarrollo del cultivo, lo que afecta en distintos grados según la etapa fenológica. La sensibilidad del maíz al déficit hídrico varía a lo largo de su ciclo de crecimiento, por lo que en algunas fases su efecto es más crítico que otras para la productividad final (Sáez-Cigarruista et al., 2024).

Según Serrato-Gutiérrez (2023), la disponibilidad limitada de agua para riego constituye una de las principales amenazas para la sostenibilidad de la agricultura y la seguridad alimentaria a nivel global. Esta problemática se agrava por la creciente frecuencia e intensidad de los eventos de sequía, atribuibles al cambio climático.

El aumento de la temperatura y las sequías recurrentes podría llegar a exponer los suelos a una severa desertización en el Arco Seco. Las altas temperaturas, aunado al estrés hídrico, tienen un efecto directo en la fenología del maíz, influenciando su potencial productivo. Los efectos del estrés hídrico en la etapa vegetativa del maíz fueron evaluados por Cakir (2004) durante tres años. En donde se obtuvieron reducciones en la biomasa de 28 a 32 %, pero no constató mayores diferencias en el rendimiento con el testigo regado durante todo el ciclo. La demanda hídrica del maíz varía según su etapa fenológica, y su sensibilidad al déficit hídrico depende del momento en que este ocurra. El impacto del estrés hídrico sobre el rendimiento está determinado por su intensidad y la fase de desarrollo en la que se manifieste, siendo la disponibilidad de humedad en el suelo el principal factor que condiciona el rendimiento y la calidad del cultivo (Sifuentes-Ibarra et al., 2021).

Estudios realizados por McWilliams et al. (1999), demuestran reducciones en el rendimiento de grano del cultivo de maíz provocado por estrés hídrico en diferentes etapas fenológicas del mismo. En la etapa de germinación a V5 no se presentó reducción por sequía o estrés hídrico. Mientras que la sequía en la etapa de V6 a V15 produjo una reducción del rendimiento de grano del 25 %, por otra parte, en la etapa de V16 a R2 afectó en un 50 % el rendimiento de grano del cultivo. Estrés hídrico en la etapa R3 a R5 produjo una merma en el rendimiento de grano de 25 %. Esta información sería una herramienta importante para establecer un excelente manejo agronómico del cultivo. Además de establecer una fecha de siembra óptima y garantizar el desarrollo del cultivo en los meses donde se dé la mayor distribución e intensidad de lluvias. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el efecto del déficit hídrico en las diferentes etapas fenológicas del cultivo del maíz.

MATERIALES Y MÉTODO

Esta investigación se realizó en la Estación Experimental del IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) en El Ejido-Los Santos. La misma está localizada entre los 7°54' de latitud Norte y 80°22' longitud Oeste, a unos 25 metros sobre el nivel del mar. Los ensayos se sembraron a partir del mes de diciembre durante cuatro años (2020 – 2023). La textura del suelo era Franco arcillosa (46-38-16) con una infiltración básica de 29.40 mm/hr y una densidad aparente de 1.38 g/cm³ en el estrato superior del suelo (Tabla 1). La unidad experimental constó de seis



surcos de 5.2 m de largo, con un arreglo de 0.75 m entre surcos y 0.20 m entre plantas. La parcela efectiva fue los dos surcos centrales de cada unidad experimental. Los tratamientos tuvieron un arreglo factorial en fajas 4 x 2 en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. En donde se evaluaron dos factores, el primero consistió en cuatro niveles de estrés en distintas etapas del cultivo en la parcela principal o faja y en el segundo factor se consideraron dos híbridos que están siendo utilizados por los productores de la región 30F-35 y ADV9293 como subparcelas.

Tabla 1

Características morfológicas del perfil del suelo, El Ejido, 2020-2023.

Profundidad (cm)	Penetrómetro (kg/cm ³)	Textura	Densidad Aparente (g/cm ³)
0 - 16 cm	650 - 500 - 700 - 700 - 600	Franco arcilloso	1.38
16 - 46 cm	600 - 700 - 520 - 700 - 680	Franco-arcillo-arenoso	1.51
46 - 78 cm	620 - 540 - 420 - 440 - 540	Franco-arcillo-arenoso	1.38
78 - 130 cm	500 - 380 - 600 - 440 - 480	Franco arcilloso	1.32
130 ≥ 160 cm	480 - 400 - 320 - 400 - 300	Franco arcilloso	1.38

Para simular la deficiencia hídrica en las distintas etapas fenológicas, se suspendió el riego por goteo desde el inicio hasta el final del periodo indicado, aplicándose esta condición a toda la faja experimental correspondiente mediante repeticiones. Una vez finalizado el tratamiento en cada parcela, el riego se reanudó con normalidad.

Un tratamiento consistió en el regado durante todo el desarrollo del cultivo (tratamiento sin estrés hídrico). El segundo tratamiento consistió en suspender el riego a partir de la cuarta semana (28 días) hasta la séptima semana (49 días) (cultivo en etapa V8), estrés previo a la floración femenina. El tercer tratamiento consistió en suspender el riego de la séptima semana (V18 a Vt) hasta la semana 12 (84 días) (cultivo en etapa de R3), estrés del inicio de la floración hasta la de fase del grano masoso. El cuarto tratamiento fue suspender el riego de la séptima semana hasta la semana 15 (105 días) (cultivo en etapa R5), estrés desde la floración femenina hasta la etapa previa a la fase de madurez fisiológica o capa negra (Tabla 2). Para el establecimiento de los tratamientos se realizó un riego hasta dejar el suelo a capacidad de campo al iniciar la fecha del estrés. Igualmente, se le aplicó un riego el día que finalizó el estrés.

Tabla 2

Tratamientos evaluados en el ensayo de determinación del efecto del déficit hídrico en maíz, El Ejido, Panamá, 2020-2023.

Tratamiento	Inicio de estrés	Finalización de estrés	Etapas del cultivo
1	Sin estrés	Sin estrés	
2	4 semana (V8) (28 dds)	7 semana (V18) (49 dds)	Prefloración
3	7 semana (V18 o Vt) (50 dds)	12 semana (R3) (84 dds)	Floración-llenado de grano
4	12 semana (R3) (85 dds)	15 semana (R5) (105 dds)	Secado de grano

El manejo agronómico se realizó según la tecnología generada por el IDIAP. En donde se utilizó una fertilización base de 273 kg·ha⁻¹ de una fórmula completa 15.8-26-10-7.56 al momento de la siembra. Una primera aplicación de la fertilización suplementaria cuando el cultivo está en etapa



de V6 de 136 kg·ha⁻¹ de urea-S (38 % N más 7 % de azufre) en aplicación al voleo sobre el surco. Luego cuando el cultivo está entre V9 a V11 se le aplicó 182 kg·ha⁻¹ de la fórmula 30-0-20 al voleo entre los surcos. El control de malezas consistió en la aplicación de la mezcla de atrazina más pendimetalina a razón de 1.5 kg·ha⁻¹ de i.a. de cada herbicida posterior a la siembra del ensayo.

Durante el ciclo del cultivo se evaluaron distintas variables agronómicas, tanto en las etapas de desarrollo como al momento de la cosecha. Entre las variables medidas, se realizaron muestreos para la determinación de biomasa o materia seca aérea al inicio y final de cada periodo de estrés; para esto se cortaron plantas se pesaron antes y después de colocarlas en un horno a 70 °C; además se realizó un conteo del número de hojas, altura de la planta y se midió el diámetro de los tallos con ayuda de un calibrador de Vernier al iniciar y suspender el riego. Se midió la floración masculina y femenina, altura de la planta y mazorca, número de plantas acamadas, número de plantas y mazorcas cosechadas, rendimiento de grano y % humedad del grano. Las variables climáticas se obtuvieron de una estación meteorológica portátil tipo Davis, ubicada a menos de 100 m lineales de la parcela experimental (Tabla 3).

Tabla 3

Variables climáticas medidas por etapa del cultivo, El Ejido, Panamá 2020-2023.

	Siembra a 28 dds	29 a 49 dds	50 a 84 dds	85 a 105 dds
Temperatura máxima-suma	910	691	1158	878
Temperatura mínima	23.0	24.3	24.2	24.5
Temperatura promedio-suma	777	601	1002	758
Radiación solar promedio	166	188	206	212
Radiación solar máxima	685	709	762	788
Humedad Relativa máxima	93.0	87.3	86.4	87.0
Humedad Relativa mínima	62.2	58.1	55.1	55.7
Humedad Relativa promedio	77.6	72.7	70.7	71.4
VPD promedio	1.03	1.25	1.35	1.37
VPD-suma	28.88	26.23	47.14	35.63

VPD = Déficit de Presión de Vapor, dds = días después de siembra

Adicional a estas variables se determinó las relaciones de crecimiento tales como Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) y Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC) por el método funcional a través de las ecuaciones descritas por Di Benedetto & Tognetti (2016) para cada tratamiento.

$$TRC = \frac{\ln MS_2 - \ln MS_1}{T_2 - T_1}$$

$$TAC = \frac{MS_2 - MS_1}{T_2 - T_1}$$



En donde:

LnMS_1 = Log natural de la materia seca al inicio del estrés

LnMS_2 = Log natural de la materia seca al final del estrés

MS_1 = Peso seco al inicio del período de estrés

MS_2 = Peso seco al final del período de estrés

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de grano y sus componentes

El análisis de varianza combinado a través de los años indicó diferencias estadísticas para los años, época del estrés y las interacciones de época del estrés por año y época del estrés por híbrido (Tabla 4).

Tabla 4

Significancia estadística y estadísticos de precisión para cada una de las variables del rendimiento y sus componentes, El Ejido, 2020-2023.

Fuente de Variación	FF	ALPT	ALMZ	PTM2	MZM2	MXP	PMZ	REND	CGR	BIOM	INDC
Repetición	0.37	0.21	0.36	0.82	0.44	0.41	0.92	0.98	0.98	0.92	0.86
Año	0.00	0.01	0.00	0.14	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Estrés	0.04	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Año*Estrés	0.12	0.00	0.00	0.27	0.06	0.22	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Híbrido	0.07	0.04	0.63	0.22	0.62	0.04	0.12	0.13	0.00	0.05	0.06
Año*Híbrido	0.36	0.01	0.10	0.20	0.57	0.79	0.32	0.14	0.13	0.09	0.04
Estrés*Híbrido	0.37	0.03	0.12	0.11	0.44	0.71	0.04	0.02	0.07	0.27	0.02
Año*Estrés*Híbrido	0.76	0.70	0.96	0.19	0.19	0.73	0.05	0.48	0.33	0.58	0.00
CV (%)	2.5	7.4	14.7	9.9	11.2	10.0	16.9	17.5	18.2	19.6	5.70
DMS/Rango	0.20	0.17	0.30	0.46	0.25	0.31	0.22	0.20	0.23	0.17	0.07

FF= Floración femenina, ALPT = Altura de planta, ALMZ = Altura de mazorcas, PTM2 = Plantas por m², MZM2 = Mazorcas por m², MXP = Mazorcas por planta, PMZ = Peso de mazorcas, REND = Rendimiento de grano, CGR = Peso de 100 granos, BIOM = Biomasa a la cosecha, INDC = Índice de cosecha, CV = Coeficiente de Variación, DMS/R = Diferencia Mínima Significativa

En cuanto al rendimiento de grano a través de los años, se encontró que los años 2021 y 2022 fueron los de mejor rendimiento (5.51 y 5.00 tha^{-1}) que 2020 y 2023 (2.61 y 3.66 tha^{-1}). Esta misma relación se encontró para la Biomasa total al momento de la cosecha encontrándose los mayores valores en los años 2021 y 2022. Con relación al número de mazorcas cosechadas, el mayor número fue cosechado en los años 2020 y 2023 (5.22 y 5.33). En el número de mazorcas por planta el 2023 presentó el valor más alto, esto debido a la mayor incidencia de la presencia de la enfermedad (Achaparramiento) causada por el complejo de patógenos CSS (Corn Stunt Spiroplasm), MBS (Maize Bushy Stunt) y VRF (virus del Rayado Fino) y transmitida por la chicharrita *Dalbulus maydis* (Tabla 5).

Las condiciones ambientales, específicamente la temperatura, la radiación solar y la disponibilidad de agua, juegan un papel crucial en el crecimiento, desarrollo y productividad final de los cultivos. En sistemas de producción extensiva de maíz, la disponibilidad hídrica suele representar el



principal factor limitante, afectando de manera directa tanto el desarrollo vegetativo como el rendimiento del cultivo (Dickie & Coronel, 2018; Gordón–Mendoza, 2020; Morales-Ruiz & Díaz-López, 2021).

Se ha documentado que cultivos como el maíz y el trigo presentan reducciones marcadas en el rendimiento cuando las temperaturas durante la floración y el llenado de grano superan los 30 °C, especialmente en regiones tropicales donde estos eventos térmicos son más frecuentes (Lobell et al., 2011). Además, el déficit hídrico o poca disponibilidad de agua en el suelo limita el crecimiento vegetal al reducir la tasa fotosintética y, por ende, la acumulación de biomasa. La disminución en la cantidad o la distribución temporal de las precipitaciones incrementa la ocurrencia de sequías, consideradas entre los principales factores adversos para la producción agrícola a nivel mundial (FAO, 2019). Como cultivo C4, el maíz presenta una alta eficiencia fotosintética, estrechamente vinculada a la estructura y funcionalidad del parénquima. Sin embargo, esta productividad se ve comprometida bajo condiciones de restricción lumínica, a las que el cultivo es particularmente sensible.



Tabla 5

Rendimiento de grano y otras variables agronómicas del ensayo, El Ejido, 2020-2023.

Época del Estrés	Híbrido	REND tha ⁻¹	CGR G	BIOM tha ⁻¹	INDC	FF días	ALPT cm	ALMZ cm	PTM2	MZM2	MXP	PMZ g
Sin Estrés	30F35	5.06	28.1	10.63	0.55	56	169	85	6.04	6.05	1.00	86
	ADV-9293	5.41	30.1	12.00	0.46	57	161	87	5.80	6.04	1.05	91
E 28-49 dds	30F35	4.01	29.8	8.11	0.52	58	149	73	5.48	5.16	0.95	78
	ADV-9293	3.74	27.7	9.00	0.45	58	128	66	5.47	5.05	0.93	75
E 50-84 dds	30F35	1.95	17.7	6.28	0.37	57	162	76	6.04	4.65	0.77	40
	ADV-9293	2.76	24.6	7.83	0.41	58	158	80	5.17	4.25	0.82	68
E 85-105 dds	30F35	4.86	28.4	9.09	0.52	56	177	89	5.75	6.01	1.04	82
	ADV-9293	5.77	29.3	11.56	0.49	57	163	87	5.77	6.14	1.06	96
	DMS	0.48	4.7	1.26	0.05	1	8	7	0.57	0.54	0.12	14
	2020	2.61	26.5	7.02	0.31	54	155	68	5.79	4.94	0.85	52
	2021	5.51	32.6	15.46	0.40	57	158	91	5.49	5.22	0.95	105
	2022	5.00	36.8	10.01	0.48	62	146	78	5.49	5.33	0.97	95
	2023	3.66	11.8	4.75	0.69	56	174	83	5.98	6.19	1.03	57
	DMS	1.00	19.5	0.66	0.05	2	13	8	0.51	0.66	0.08	13
Sin Estrés		5.24	29.1	11.32	0.50	57	165	86	5.92	6.04	1.02	89
E 28-49 dds		3.88	28.7	8.55	0.48	58	139	69	5.48	5.11	0.94	76
E 50-84 dds		2.35	21.2	7.05	0.39	57	160	78	5.60	4.45	0.79	54
E 85-105 dds		5.32	28.8	10.32	0.50	56	170	88	5.76	6.07	1.05	89
DMS		0.49	2.8	0.66	0.03	1	10	5	0.37	0.36	0.07	11
	30F35	3.97	26.0	8.53	0.52	57	164	81	5.83	5.47	0.94	72
	ADV-9293	4.42	27.9	10.10	0.47	58	152	80	5.55	5.37	0.96	82
	DMS	0.76	0.5	1.57	0.03	1	11	5	0.67	0.69	0.02	17

REND = Rendimiento de grano, CGR = Peso de 100 granos, BIOM = Biomasa a la cosecha, INDC = Índice de cosecha FF= Floración femenina, ALPT = Altura de planta, ALMZ = Altura de mazorcas, PTM2 = Plantas por m², MZM2 = Mazorcas por m², MXP = Mazorcas por planta, PMZ = Peso de mazorcas. DMS = Diferencia Mínima Significativa, E = Estrés en la etapa, dds = días después de siembra

Reducciones significativas en la disponibilidad de radiación solar pueden provocar una disminución sustancial en el número de espigas por planta, lo cual compromete de manera directa el potencial de rendimiento del maíz, especialmente cuando esta limitación ocurre en etapas reproductivas críticas (Yang et al., 2022). El estrés por baja luminosidad reduce significativamente el rendimiento del maíz, principalmente al afectar el número de granos por hilera y el peso de 1000 granos, sin alterar el número de hileras por mazorca (Andayani et al., 2020).

En relación con la época que se sometió a estrés el cultivo, la etapa más afectada fue el estrés entre la floración masculina y la etapa R3 (50 a 84 dds) con un rendimiento de 2.35 tha⁻¹, seguido por el estrés prefloración (28 a 49 dds) la cual presentó un rendimiento promedio de 3.88 tha⁻¹. El primer rendimiento representa una reducción del 55 % y el segundo de 26 % con respecto a las parcelas que no tuvieron estrés en ningún momento del desarrollo (rendimiento de 5.24 tha⁻¹). El rendimiento de grano en las parcelas con estrés al cultivo posterior de los 85 días hasta los 105 dds (5.32 tha⁻¹) no difirió significativamente de las parcelas sin estrés (Figura 1). El índice de cosecha se presentó en el mismo orden que el rendimiento de grano, en donde los valores más bajos se obtuvieron en el estrés entre 50 a 84 dds (0.39), seguido por las parcelas sometidas a estrés entre

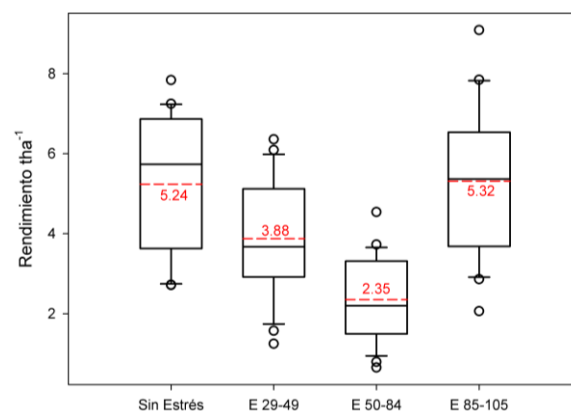


28 y 49 dds (0.48). El bajo rendimiento en la parcela con estrés en la floración se reflejó en el menor peso de los 100 granos (21.2 g), así como en el menor número de mazorcas por planta (0.79) y menor peso de biomasa total (7.05 tha^{-1}).

Esto concuerda con los resultados publicados Cheng et al. (2021), quienes indicaron que el estrés hídrico durante la etapa de llenado de grano es crítico para el rendimiento del maíz, ya que afecta la translocación de asimilados y la expansión del grano. En condiciones de déficit hídrico, se reduce la actividad fotosintética y se acentúa el cierre estomático, lo cual limita la producción de foto asimilados disponibles para el llenado de los granos (Farooq et al., 2009). Además, el déficit hídrico del maíz produce una gran variación en el proceso fotosintético debido a la reducción de los pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b), la conductancia estomática, la actividad del fotosistema y las enzimas (Pokhrel, 2021). Estos efectos fisiológicos combinados resultan en una menor acumulación de materia seca en los granos, lo que compromete el rendimiento final y resalta la vulnerabilidad del cultivo durante esta etapa fenológica crítica.

Figura 1

Rendimiento de grano de maíz según época o período estresado sin riego, El Ejido, Panamá, 2020-2023.



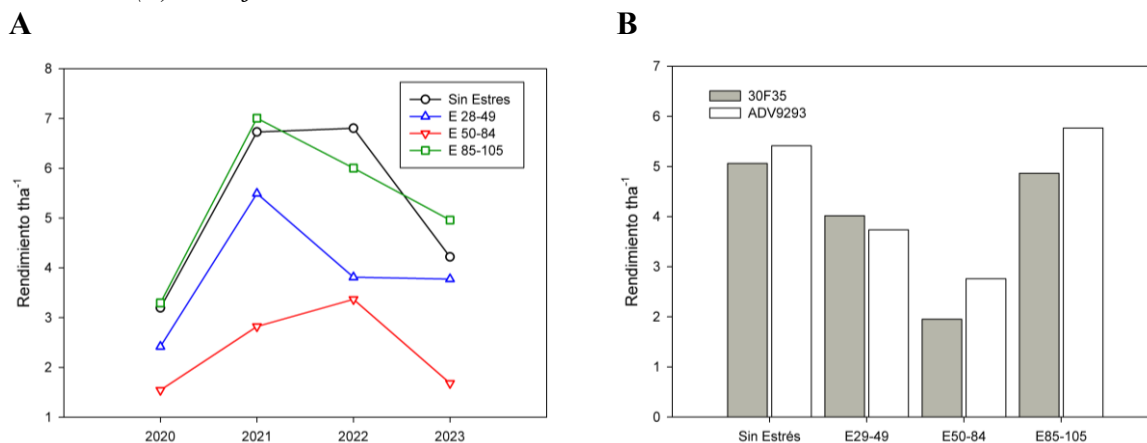
En relación con la interacción de la época del estrés por año se encontró en los años 2020 y 2022 el estrés en prefloración y después de la floración fueron muy similares, encontrándose poca diferencia entre ambos (menos de una tonelada por hectárea). Por el contrario, en los años 2021 y 2023 la diferencia entre ambos fue mayor de dos toneladas (Figura 2A). En ambos casos el menor rendimiento fue cuando el estrés fue después de la floración hasta los 85 dds. En la figura 2B se presenta la interacción de híbridos por época del estrés, se encontró que el híbrido 30F35 se vio más afectado con el estrés post floración que el ADV9293 (1.95 vs 2.76 tha^{-1}), por el contrario, el 30F35 es menos afectado que el ADV9293 cuando el estrés se realiza en prefloración (4.01 vs 3.74 tha^{-1}). Este resultado podría ser explicado por ser el ADV9293 más tardío que el 30F35. Resultados muy similares se encontró cuando se analizaron variables asociadas al rendimiento como lo son el peso de las mazorcas y el peso de 100 granos; en donde las parcelas con el estrés después de la floración (50-84 dds) presentó el menor peso de mazorcas (54 g) y el menor peso de los 100 gr (21.2 g). Este resultado indica que el cultivo de maíz posee cierta capacidad de recuperación o tolerancia en las fases finales de desarrollo, una observación que ha sido reportada en otras investigaciones realizadas en condiciones tropicales (Yasin et al., 2024). Además, Gupta et al.

(2024), señalaron que los genotipos tropicales de maíz difieren significativamente en su tolerancia al estrés hídrico, especialmente en la fase reproductiva.

Durante la fase de madurez fisiológica, las plantas de maíz experimentan una disminución progresiva en su actividad fisiológica. Esta reducción se manifiesta en una menor apertura estomática y una disminución en la absorción de agua y nutrientes, lo cual responde a una demanda metabólica decreciente en esta etapa. Como resultado, la sensibilidad del cultivo al déficit hídrico se ve atenuada, ya que los requerimientos fisiológicos del grano en formación han sido mayormente satisfechos en fases previas (Fahad et al., 2017).

Figura 2

Rendimiento de grano según la interacción periodo de estrés por año (A) y periodo de estrés por híbrido (B), El Ejido, Panamá, 2020-2023.



En relación con el total de mazorcas cosechadas, la relación fue similar a la del rendimiento, en donde los mayores números a la cosecha fueron las parcelas sin estrés y estrés tardío (84-105) le siguió las parcelas con estrés prefloración y el menor número cosechado en las parcelas con estrés a partir de la floración. Para la variable altura de planta a la floración el ADV9293 fue el híbrido que presentó menor tamaño de plantas con 139 cm de altura, por otra parte, el 30F35 tuvo una media de altura de 165 cm (Tabla 5). En cuanto al estrés hídrico, el estrés en prefloración (E-28-49) fue el que presentó menor altura de planta con 139 cm. Esta fue la altura más baja de manera significativa en comparación con los otros tratamientos (160, 165 y 170 cm). La biomasa final fue significativamente mayor en las parcelas sin estrés y estrés tardío (11.32 y 10.32 tha^{-1}) y la menor cantidad producida se dio en las parcelas con estrés a partir de la floración (7.05 tha^{-1}). En cuanto al índice de cosecha el mismo fue similar en todos los tratamientos, excepto en el estrés post floración el cual presentó un 39 % de relación grano con biomasa total (Tabla 5).

Efecto del estrés hídrico sobre los componentes

En la tabla 6 se presentan las significancias de las fuentes de variación del análisis del contenido de materia seca (MS), altura de planta (ALT) al iniciar y finalizar cada periodo de estrés hídrico del tratamiento, mientras que para la tasa relativa de crecimiento (TRC) y tasa absoluta de crecimiento (TAC) se presentan las significancias de cada periodo de estrés de prefloración (PrF), post floración (PoF) y secado de grano (SG). Se encontró que hubo significancia estadística para



todas las variables para años, mientras que para la etapa del estrés y de su interacción por año se presentó en algunas de las variables medidas. Este resultado indica una fuerte influencia de las condiciones ambientales interanuales, como la variabilidad en precipitación y temperatura, sobre el desarrollo del cultivo, especialmente en los días 49 y 85 después de la siembra (dds). Estas condiciones climáticas determinan en gran medida el crecimiento del maíz, como lo documenta Campos et al. (2023), quienes destacan que la acumulación de biomasa y la eficiencia fisiológica del cultivo están estrechamente ligadas a la disponibilidad hídrica y térmica. Por otro lado, la variabilidad interanual en temperatura, precipitación y radiación solar influyen significativamente en la fisiología y el rendimiento de cultivos (Sinclair & Muchow, 2001; Lobell et al., 2011).

El estrés hídrico en etapas intermedias del desarrollo afecta la expansión celular, la elongación del tallo y la eficiencia en la captura de luz, lo que limita la producción de biomasa. Estas observaciones son coherentes con estudios recientes realizados en maíz bajo condiciones tropicales, los cuales indican que la reducción de la actividad estomática y fotosintética durante períodos de estrés hídrico afecta negativamente el crecimiento y la productividad del cultivo (Fahad et al., 2017; Yasin et al., 2024).

Tabla 6

Significancia estadística para las variables materia seca, altura de planta y las Tasas de crecimiento para cada fuente de variación, El Ejido, Panamá, 2020-2023.

Fuente de Variación	Materia Seca			Altura de Planta			TRC			TAC		
	28 dds	49 dds	85 dds	28 dds	49 dds	85 dds	PrF	PoF	SG	PrF	PoF	SG
Repetición	0.37	0.31	0.17	0.21	0.49	0.65	0.61	0.10	0.04	0.39	0.17	0.17
Año	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
Estrés	0.58	0.03	0.01	0.99	0.01	0.00	0.12	0.29	0.03	0.02	0.06	0.06
Año*Estrés	0.01	0.15	0.48	0.00	0.00	0.00	0.46	0.61	0.59	0.21	0.50	0.50
Híbrido	0.21	0.48	0.27	0.02	0.20	0.06	0.21	0.85	0.11	0.43	0.52	0.52
Año*Híbrido	0.49	0.98	0.03	0.82	0.45	0.06	0.57	0.20	0.10	0.97	0.14	0.14
Estrés*Híbrido	0.64	0.84	0.18	0.56	0.11	0.15	0.81	0.38	0.23	0.84	0.25	0.25
Año*Estrés*Híbrido	0.74	0.14	0.72	0.93	0.20	0.33	0.01	0.30	0.51	0.11	0.45	0.45
CV (%)	25.1	31.9	38.3	8.0	7.9	9.5	17.7	51.3	81.0	37.8	60.6	60.6
DMS/Rango	0.19	0.13	0.21	0.32	0.26	0.18	0.10	0.14	0.16	0.13	0.18	0.15

PrF = Prefloración, PoF = Post Floración, SG = Secado de Grano, TRC =Tasa Relativa de Crecimiento, TAC= Tasa Absoluta de Crecimiento, dds =Días después de siembra, CV = Coeficiente de Variación, DMS = Diferencia Mínima Significativa

Con relación a las alturas en las tres fechas o edades del cultivo medidas, las que presentaron menor valor fue en el año 2020. Esta misma relación se observó en el peso de la Biomasa o materia seca al momento de hacer los muestreos en función de los años (Tabla 7). En cuanto a las tasas de crecimiento el comportamiento si fue variado a través de los años así se observa que, en prefloración el año 2022 presenta las menores tasas ($0.07 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ y $2.21 \text{ g} \cdot \text{día}^{-1}$). No obstante, el estrés en post floración las menores TCR y TCA son observadas en los años 2020 y 2023. Ya para la etapa de llenado de grano en el 2021 fue la que presentó la menor tasa de crecimiento.

La altura de las plantas presentó una mayor expresión de crecimiento estructural bajo condiciones más favorables, asociado a una buena disponibilidad de agua durante la etapa vegetativa. Blum (2011) señala que el alargamiento celular es particularmente sensible al estrés hídrico, y que el crecimiento en altura puede mantenerse si el estrés ocurre en etapas posteriores. Los efectos presentados por la variable masa seca coincide con lo presentado por Sinclair & Muchow (2001), quienes destacaron que la biomasa total está estrechamente ligada a la disponibilidad de agua y a



la radiación interceptada eficientemente durante el ciclo del cultivo. Sáez-Cigarruista et al. (2024), también recalcan que el estrés hídrico afecta negativamente la acumulación de materia seca, en especial cuando se presenta durante las fases críticas del desarrollo.

Tabla 7

Rendimiento de materia seca, altura de planta y Tasas de crecimiento para cada fuente de variación, El Ejido, Panamá, 2020-2023.

Época del Estrés	Híbrido	Materia Seca (tha ⁻¹)			Altura de planta (cm)			TRC (g·g ⁻¹ ·día ⁻¹)			TAC (g·día ⁻¹)		
		28	49	84	28	49	84	PrF	PoF	SG	PrF	PoF	SG
Sin Estrés	30F35	15.0	91.4	236.5	109	184	160	0.08	0.03	-0.02	3.6	4.1	-3.1
	ADV-9293	12.1	95.9	245.4	105	175	149	0.09	0.03	-0.01	4.0	4.3	-2.6
E 28-49 dds	30F35	12.7	68.9	197.5	108	194	212	0.08	0.03	-0.01	2.7	3.7	-2.4
	ADV-9293	12.8	76.7	178.0	107	195	203	0.08	0.02	0.00	3.0	2.9	-0.5
E 50-84 dds	30F35	14.5	88.8	157.9	132	202	159	0.08	0.02	-0.01	3.5	2.0	-1.9
	ADV-9293	13.3	87.0	224.2	129	188	134	0.09	0.02	-0.01	3.5	3.9	-1.9
E 85-105 dds	30F35	15.8	97.3	259.0	112	175	179	0.08	0.03	-0.03	3.9	4.6	-5.5
	ADV-9293	13.5	110.4	292.1	108	170	171	0.10	0.03	-0.02	4.6	5.2	-5.3
	DMS	4.1	29.1	58.8	7	15	9	0.02	0.01	0.01	1.5	2.1	2.1
	2020	10.6	67.9	148.6	107	180	155	0.09	0.02	-0.01	2.72	2.31	-1.51
	2021	13.4	132.3	319.2	108	194	208	0.11	0.03	-0.02	5.66	5.34	-4.74
	2022	14.8	61.2	250.2	130	195	146	0.07	0.04	-0.01	2.21	5.40	-2.87
	2023	16.0	96.9	177.4	110	173	175	0.09	0.02	-0.02	3.85	2.30	-2.44
	DMS	2.5	19.1	61.8	54	8	9	0.01	0.01	0.01	0.90	1.63	1.63
Sin Estrés		13.5	93.6	241.0	114	193	178	0.09	0.03	-0.01	3.8	4.2	-2.8
E 28-49 dds		12.8	72.8	187.8	113	162	148	0.08	0.03	-0.01	2.9	3.3	-1.5
E 50-84 dds		13.9	87.9	191.1	114	189	174	0.09	0.02	-0.01	3.5	2.9	-1.9
E 85-105 dds		14.7	103.8	275.6	114	197	183	0.09	0.03	-0.03	4.2	4.9	-5.4
DMS		3.2	17.8	46.8	7	17	13	0.01	0.01	0.01	0.8	1.5	1.5
	30F35	14.5	86.6	212.7	115	189	178	0.08	0.03	-0.02	3.4	3.6	-3.2
	ADV-9293	12.9	92.5	235.0	112	182	164	0.09	0.03	-0.01	3.8	4.1	-2.6
	DMS	3.6	29.2	62.8	2	16	15	0.02	0.01	0.01	1.6	2.6	2.6

E= Estrés en la etapa X, PrF = Prefloración, PoF = Post Floración, SG = Secado de Grano, TRC = Tasa de Crecimiento Relativo, TAC = Tasa de Crecimiento Absoluto, DMS = Diferencia Mínima Significativa, dds = días después de siembra

En cuanto a las tasas de crecimientos en las distintas etapas sometidas a estrés (a través de ambos híbridos), los valores más bajos corresponden a las parcelas que son sometidas a cualquier tipo de estrés hídrico. Así se observa que las menores tasas de crecimiento relativo (TRC) y tasa de crecimiento absoluto (TAC) se obtuvieron durante el período de estrés de 28 a 49 dds con valores de 0.08 g·g⁻¹·día y 2.9 g·día⁻¹, respectivamente. Situación similar se observa en el cálculo de estas tasas (TRC y TAC) en donde las menores tasas fueron de 0.02 g·g⁻¹·día y 2.9 g·día⁻¹ se obtuvieron en las parcelas a las que fueron sometidas al estrés en post floración (E-50-84). El estrés hídrico después de los 84 días provocó la menor tasa de crecimiento en las parcelas sometidas a estrés en la etapa de secado del grano (E85-105) (Tabla 7). No se presentó diferencias estadísticas en las tasas de crecimiento (TRC y TAC) entre los dos híbridos evaluados en este experimento.

Los tratamientos sin deficiencia hídrica en el suelo favorecieron significativamente el incremento de las tasas relativas y absolutas de crecimiento. Estos resultados coinciden con lo reportado por Sáez-Cigarruista et al. (2024), quienes destacaron que la disponibilidad hídrica adecuada promueve una mayor actividad fotosintética y una eficiente translocación de asimilados hacia los órganos en desarrollo, lo que se traduce en un crecimiento más vigoroso del cultivo. Por el contrario, los tratamientos sometidos a estrés hídrico mostraron reducciones notables en dichas



tasas, lo cual se atribuye a la disminución de la fotosíntesis y a las restricciones en el transporte y absorción de agua esenciales para los procesos fisiológicos de la planta.

Además, Sharifi (2017) indica que la TRC tiende a decrecer con el avance del ciclo fenológico de la planta, debido a que los tejidos que se incorporan progresivamente son de naturaleza estructural, presentan baja actividad metabólica y carecen de función fotosintética directa. Además, el aumento de la biomasa genera auto competencia por la luz, lo que induce una mayor cobertura foliar (sombreamiento foliar) y reducción de la capacidad fotosintética neta. Aunque la acumulación de materia seca total continúa con el tiempo, este incremento está asociado principalmente al desarrollo de tejidos de sostén, lo que disminuye la proporción de tejido activo en crecimiento y, en consecuencia, reduce la TRC.

La etapa de floración y llenado de grano fue la más afectada, debido a que es la etapa donde el cultivo tiene la mayor tasa de absorción de agua (Sah et al., 2020). Además, coincidió con el aumento de las variables climáticas como la suma de las temperaturas máximas y promedio, menor humedad relativa promedio diaria y mayor suma del déficit de presión de vapor lo que se relaciona a un mayor estrés ambiental.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación indican que no todas las fases del cultivo de maíz se ven afectadas de la misma manera por el déficit hídrico. Siendo la fase de floración y llenado del grano (50 a 84 dds) la más afectada, mientras que el estrés en la prefloración tiene un menor impacto en el rendimiento de grano.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Andayani, N. N., Riadi, M., Rafiuddin, Kalqutny, S. H., Efendi, R., & Azrai, M. (2020). Evaluation of yield and agronomic components of three-way cross maize hybrids under low-light environment. IOP conference series. Earth and Environmental Science, 484(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012016>
- Blum, A. (2011). Plant breeding for water-limited environments. (Vol. XIV), Springer, New York, 258 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7491-4>
- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research, 89, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>



- Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, S., Liao, Z., Zhang, F., & Wang, Y. (2021). A global meta-analysis of yield and water use efficiency of crops, vegetables and fruits under full, deficit and alternate partial root-zone irrigation. *Agricultural Water Management*, 248 (106771). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106771>
- Di Benedetto, A., & Tognetti, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(3), 258-282. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86449712008.pdf>
- Dickie, M., & Coronel, A., (2018). Relación estadística entre los rendimientos de maíz y la ocurrencia de deficiencias hídricas en el Departamento de Rosario. *Ciencias Agronómicas*, 31, 17–24. <https://rephip.unr.edu.ar/items/f44c688c-1903-46e2-990f-40316cc0e971>
- FAO. (2019). The state of the world's biodiversity for food and agriculture. J. Bélanger & D. Pilling (eds.). FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome. 572 pp.(<http://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf>)
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8(1147). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S.M.A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Gordón-Mendoza, R. (2020). Variabilidad climática y su efecto sobre la producción de maíz. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá. 40 p <http://www.idiap.gob.pa/download/variabilidad-climatica-y-su-efecto-sobre-la-produccion-de-maiz/>
- Lobell, D.B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- McWilliams, D.A., Berglund, D.R., & Endres, G.J. (1999) Corn growth and management Quick Guide. North Dakota Cooperative Extension Service, Fargo, 1-8. A1173 <https://www.ndsu.edu/agriculture/sites/default/files/2022-09/a1173.pdf>
- Morales-Ruiz, A., & Díaz-López, E. (2021). Influencia de la temperatura, precipitación y radiación solar en el rendimiento de maíz en El Valle de Toluca, México. *Agrociencia*, 54(3), 377–385. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i3.1933>
- Pokhrel, S. (2021). Effects of drought stress on the physiology and yield of the maize: A review. *Food and Agri Economics Review*, 1(1), 36–40. <https://doi.org/10.26480/faer.01.2021.36.40>



- Sáez-Cigarruista, A., Morales-Guevara, D., Gordón-Mendoza, R., Jaén-Villarreal, J., & Ramos-Manzané, F. (2024). Sensibilidad del cultivo de maíz (*Zea mays*) a diferentes períodos de déficit hídrico controlado. *Agronomía Mesoamericana*, 35(55660). <https://doi.org/10.15517/am.2024.55660>
- Sah, R. P., Chakraborty, M. Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V. K., Chakravarty, M. K., Narayan S. C., Rana, M., & Moharana, D. (2020). Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. *Scientific Reports*, 10(2944). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>.
- Serrato-Gutiérrez, M. G. (2023). Mitigación del estrés por déficit hídrico en maíz forrajero mediante el uso de PGPB. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85381>
- Sharifi, P. (2017). Estudio de los índices de crecimiento del maíz en diferentes condiciones de estrés hídrico y el uso de ácidos húmicos. *Revista Biomédica y Farmacológica*, 10 (01), 303–310. <https://doi.org/10.13005/bpj/1110>
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Macías-Cervantes, J., Mendoza-Pérez, C., & Preciado-Rangel, P. (2021). Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. *Agrociencia*, 55(3), 209–226. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2414>
- Yang, Y., Liu, G., Guo, X., Liu, W., Xue, J., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Li, S., & Hou, P. (2022). Effect mechanism of solar radiation on maize yield formation. *Agriculture*, 12(12), 2170. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122170>
- Yasin, S., Zavala-García, F., Niño-Medina, G., Rodríguez-Salinas, P.A., Gutiérrez-Diez, A., Sinagawa-García, S.R., & Lugo-Cruz, E. (2024). Morphological and physiological response of maize (*Zea mays* L.) to drought stress during reproductive stage. *Agronomy*, 14(8), 1718. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081718>