

II. VARIABLES CLIMÁTICAS QUE AFECTAN EL MAÍZ SEGÚN FECHAS DE SIEMBRA EN LA REGIÓN DE AZUERO¹

**Román Gordón-Mendoza²; Ana E. Sáez-Cigarruista³; Francisco P. Ramos-Manzané⁴;
Jorge I. Núñez-Cano⁵; Jorge E. Franco-Barrera⁶**

RESUMEN

Se realizó el estudio con el objetivo de determinar el efecto de las distintas variables climáticas en el cultivo de maíz en la Región de Azuero. Para esto se sembró un ensayo en la Estación Experimental El Ejido, ubicada en la provincia de Los Santos, Panamá. El ensayo fue sembrado entre los años 2015 al 2024. La unidad experimental fue de seis surcos de 5,2 m de largo y la parcela efectiva consistió en los dos surcos centrales. El diseño utilizado fue el de Bloques completos al azar con tres repeticiones. Se evaluaron tres factores en un arreglo Factorial en Fajas dobles 3 x 3 x 2. La parcela principal fue la fecha de siembra (agosto, septiembre y octubre), las sub-parcelas el sistema de secano y riego por goteo y las sub-sub-parcelas dos híbridos de uso por los productores de la Región. Un análisis de componentes principales indicó que a mayor población de plantas, precipitación y humedad relativa mayor es el potencial de rendimiento del cultivo. Por otro lado, variables climáticas como déficit de presión de vapor (VPD), evapotranspiración potencial, temperatura promedio, radiación solar y ultravioleta afectan negativamente al rendimiento de grano. El déficit de presión de vapor es la variable que presentó los coeficientes de correlación más altos en ambos sistemas y su relación es inversa o negativa (-0,74 y -0,82, respectivamente). La variable VPD es la que presentó el mayor parámetro estimado de valor negativo en ambos sistemas (-10,020 en secano y -11,931 en riego suplementario), lo que indica que a mayor valor de esta variable en el ambiente más se reduce el rendimiento de grano.

Palabras clave: Déficit de presión de vapor, estrés ambiental, humedad relativa, radiación solar.

¹Recepción: 27 de agosto de 2025. Aceptación: 03 de octubre de 2025.

²Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), Centro de Innovación Agropecuaria de Azuero "Ing. Germán De León" (CIA-Azuero), Los Santos, Panamá. e-mail: gordon.roman@gmail.com;
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8433-2357>

³IDIAP, CIA-Azuero, Panamá. PhD. Ecofisiología Vegetal. e-mail: ansacig@gmail.com;
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4901-7263>

⁴IDIAP, CIA-Azuero, Panamá. Ingeniero Agrónomo. e-mail: franciscoramos2016@gmail.com;
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0003-3203-3069>

⁵IDIAP, CIA-Azuero, Panamá. PhD Nutrición Mineral e-mail: jorgenunezcano@gmail.com;
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3417-4791>

⁶IDIAP, CIA-Azuero, Panamá. M.Sc. Ambiente. e-mail: joenfra13@gmail.com;
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-0247-411X>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

II. CLIMATIC VARIABLES AFFECTING MAIZE AS A FUNCTION OF PLANTING DATE IN THE AZUERO REGION

ABSTRACT

A study was conducted to determine the effect of key climatic variables on maize production in the Azuero Region of Panama. The experiment was established at the El Ejido Experimental Station, located in Los Santos Province, Panama, and was planted annually from 2015 to 2024. The experimental unit consisted of six rows, each 5.2 m long, with the effective plot defined as the two central rows. A randomized complete block design with three replications was used. Three factors were evaluated in a $3 \times 3 \times 2$ split-split plot factorial arrangement: the main plot was planting date (August, September, and October), the subplots were production system (rainfed or supplemental drip irrigation), and the sub-subplots consisted of two hybrids commonly used by producers in the region. Principal component analysis indicated that higher plant population, accumulated rainfall, and relative humidity were associated with greater yield potential. Conversely, several climatic variables-vapor pressure deficit (VPD), potential evapotranspiration, mean temperature, solar radiation, and ultraviolet radiation-had adverse effects on grain yield. VPD showed the strongest correlations in both production systems, with negative coefficients of -0.74 (rainfed) and -0.82 (supplemental irrigation). VPD also exhibited the most significant negative regression coefficients in both systems (-10.020 under rainfed conditions and -11.931 under supplemental irrigation), indicating that higher atmospheric demand strongly reduces grain yield.

Key words: Vapor pressure deficit, environmental stress, relative humidity, solar radiation.

INTRODUCCIÓN

El país es frecuentemente afectado por eventos hidro meteorológicos, tales como sequías, inundaciones y deslizamientos. Los posibles escenarios de cambio climático para Panamá revelan modificaciones en esta área en relación con los patrones de temperatura y precipitación. Estas incluyen un ambiente más cálido, de 2° a 3° C sobre las temperaturas actuales, en tanto que la variación en los patrones de lluvia podría estar en el rango de +/- 10%, según corresponda. Sin embargo, cambios relativos en el clima de Panamá ya están ocurriendo, como lo muestra la tendencia a episodios más cálidos en el año 2015 (de 1° C por encima de los valores históricos), así como el hecho que en los últimos 50 años la



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

precipitación interanual cayó de 50 a 100 mm por año, lo que equivale a una variación negativa de 6 a 10% en el volumen de lluvias en la temporada lluviosa (Autoridad Nacional del Ambiente [ANAM], 2011).

La interacción negativa entre sequía y eficiencia en los sistemas agropecuarios tiene repercusiones negativas tanto de índole económica, como ambiental. Esta interacción aumenta la contaminación por exceso de fertilizantes y otros insumos agropecuarios. El maíz es uno de los principales cultivos para los agricultores con bajos recursos de Panamá, además de formar parte fundamental de la dieta en la mayor parte del país. Frecuentemente se cultiva en áreas marginales y expuestas a sequías estacionales. El desarrollo de prácticas agronómicas que mitiguen el efecto de la sequía y mejoren la eficiencia de las prácticas agronómicas producirá beneficios económicos para los agricultores, y contribuirá a mitigar el efecto del cambio climático al reducir el impacto de la sequía.

De todos los cambios ambientales asociados al cambio climático los más evidentes son el aumento en las temperaturas a las que los cultivos serán expuestos, así como la alta variabilidad en la precipitación pluvial en las épocas de producción de alimentos (Ruane et al., 2013). Estos cambios pueden afectar negativamente la productividad de todos los cultivos. Existe un aumento global del déficit de presión de vapor atmosférico (DPV), una tendencia que se prevé que continúe con el calentamiento global. Este fenómeno se ha asociado con disminuciones de la productividad en los ecosistemas y pérdidas de rendimiento en los cultivos, lo que se atribuye a limitaciones fotosintéticas derivadas de la disminución de la conductancia estomática (López et al., 2021; Grossiord et al., 2020).

La sensibilidad del rendimiento a un estrés abiótico como la temperatura es, generalmente, mucho mayor si el estrés ocurre durante el período alrededor de la floración o durante el llenado de los granos, que afecta el peso final de los granos (Dong et al., 2021). Elevadas temperaturas perjudicarán los dos principales componentes del rendimiento: el número de granos por unidad de área, principal componente agronómico del rendimiento, y el peso medio de los granos por la menor disponibilidad de carbohidratos



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

para el desarrollo de estos (Niu et al., 2021; Bheemanahalli et al., 2022). Sin embargo, las causas fisiológicas que generan estas penalidades a la productividad no han sido claramente dilucidadas, como tampoco ha sido determinadas las prácticas culturales derivadas de un mejor conocimiento de la fisiología de la tolerancia a las altas temperaturas.

El vapor de agua es un gas y su presión contribuye a la presión atmosférica total. La cantidad de vapor de agua en el aire se relaciona directamente con la presión parcial ejercida por ese vapor de agua en el aire; es una medida directa del contenido de vapor de agua del aire y es conocida como Presión de vapor actual (e_a). Cuando un volumen de aire se encuentra retenido sobre una superficie evaporante de agua, se alcanza un equilibrio entre las moléculas de agua que se incorporan al aire y las que vuelven a la fuente de agua. En ese momento, se considera que el aire está saturado puesto que no puede almacenar ninguna molécula de agua adicional. La presión correspondiente se llama presión de vapor a saturación ($e^{\circ}(T)$). La cantidad de moléculas de agua que se pueden almacenarse en el aire depende de la temperatura (T). Cuanto más alta es la temperatura del aire, más alta es la capacidad de almacenar vapor de agua y más alta es la presión de vapor a saturación. El déficit de presión de vapor (VPD, por sus siglas en inglés) es la diferencia entre la cantidad de humedad que el aire puede contener cuando está saturado ($e^{\circ}(T)$) y la cantidad de humedad que realmente contiene (e_a) y es un indicador de la sequedad del aire. El VPD es un factor ambiental clave que influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de mecanismos diferentes a la temperatura influenciando las funciones de los estomas y la fotosíntesis (Inoue et al., 2021; Hsiao et al., 2019; Sanginés et al., 2017). A pesar de ello, pocos estudios han aislado la respuesta fisiológica del funcionamiento de las plantas a un PDV elevado, lo que limita nuestra comprensión y capacidad para predecir los impactos futuros en los ecosistemas terrestres (Grossiord et al., 2020).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Por otra parte, el agua es vital en la producción de cultivos, la falta de este elemento provoca una menor área foliar, menor fotosíntesis y como consecuencia una menor producción. El cultivo con escasez de agua puede abordarse de dos formas: prácticas de manejo agronómico (riego, labranza) y el mejoramiento genético (variedades alto rendimiento bajo condiciones de sequía). La solución a los problemas ocasionados por la escasez de agua requiere comprender y poder estimar el almacenamiento y movimiento de agua en el suelo, su absorción y movimiento en la planta y su pérdida por evaporación y transpiración. Se realizó el estudio con el objetivo de determinar el efecto de las distintas variables climáticas en el cultivo de maíz en la Región de Azuero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Estación Experimental del IDIAP en El Ejido-Los Santos. Localizada entre los 7°54' de latitud Norte y 80°22' longitud Oeste, a unos 25 msnm. El manejo agronómico en cuanto a control de maleza y fertilización se realizó según la tecnología generada por el IDIAP (Gordón-Mendoza, 2021).

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 fueron los dos surcos centrales de cada unidad experimental. El diseño utilizado fue el de Bloques completos al azar con tres repeticiones. Se evaluaron tres factores en un arreglo Factorial en Fajas dobles 3 x 3 x 2. Se realizó la siembra en tres fechas distintas (agosto, septiembre y octubre) separadas 20 días entre las mismas. Se evaluaron dos híbridos de maíz y dos sistemas uno con riego por goteo suplementario, y seco dependiente de las lluvias de la temporada. El sistema de riego se utilizó para mantener las parcelas a capacidad de campo (de acuerdo con monitoreos con tensiómetros ubicados en las parcelas), mientras que las de seco sometieron a las plantas al estrés natural de falta de lluvias de cada fecha de siembra a través de los años. Se midieron las variables más comunes en el cultivo como lo son: Floración femenina, altura de la planta y mazorca, número de plantas acamadas, rendimiento de grano, porcentaje de humedad, número de plantas y mazorcas cosechadas y biomasa total a los 20, 40, 60, 80 y 100 días después de siembra (dds). Las variables climáticas se obtuvieron de una estación meteorológica portátil tipo Davis®, ubicada a menos de 100 m lineales de la parcela experimental. Se midió la precipitación pluvial,



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

temperatura máxima y mínima del aire, porcentaje de humedad relativa máxima y mínima, radiación solar, radiación ultravioleta, energía solar. Se calculó la evapotranspiración potencial de acuerdo con la ecuación de Penman Monteith y el déficit de presión de vapor (VPD) de acuerdo con Allen et al., 2006.

El desarrollo del cultivo se dividió en cuatro fases. La primera fase va de la siembra a los 30 días después de la siembra (0 a 30 dds), esta fase se considera como de establecimiento y desarrollo inicial del cultivo. La segunda fase se inició a los 31 dds y concluye en la etapa de iniciación de espiga masculina o Vt (0 a 50 dds) y se denominó Prefloración. La tercera fase inicia en la floración masculina hasta finalizando la etapa R2 del cultivo (51 a 80 dds), la cual es considerada como polinización y llenado de grano. La cuarta y última fase inicia a los 81 dds y culmina hasta los 100 dds y se denominó fase de secado de grano. Todas las variables climáticas medidas se dividieron y calcularon (promedios o suma acumulada) en estas cuatro fases del cultivo y en el periodo de 51 a 100 dds (3ª y 4ª fases juntas).

Los datos climáticos por fase se corrieron con un análisis de Componentes Principales con el uso del programa Infostat® para determinar la relación gráfica entre las variables climáticas y el rendimiento de grano en seco. Luego los mismos se correlacionaron con el rendimiento de grano para cada fecha de siembra por sistema de siembra (secano y riego). Posteriormente se procedió a realizar una regresión múltiple entre el rendimiento de grano por sistema y las distintas variables climáticas a través del procedimiento Stepwise de SAS para estimar el efecto que tienen estas sobre el rendimiento. En el Cuadro 1 se presentan los valores de las distintas variables climática medidas en las dos fases del cultivo (tercera y cuarta fase) a través de los años de evaluación.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cuadro 1. Principales variables climáticas medidas en la tercera (51 a 80 dds) y cuarta fase (81 a 100 dds) del cultivo de maíz en las tres fechas de siembra por año, 2015-2024.

Fechas de siembra	Lluvia (mm)		Temperatura (°C)		Radiación (W/m²)		Energía solar (MJ/m²)		Humedad relativa (%)		Radiación ultravioleta		ETO (mm/día)		VPD (kPa)	
	51-80	81-100	51-80	81-100	51-80	81-100	51-80	81-100	51-80	81-100	51-80	81-100	51-80	81-100	51-80	81-100
ago-15	5,0	50,4	26,9	26,7	177	163	334	333	87,1	86,7	14,6	14,9	3,18	3,11	0,79	0,78
sep-15	50,4	0,0	27,1	28,5	180	205	369	387	84,6	79,2	16,1	16,4	3,48	4,12	0,82	1,08
oct-15	0,0	0,0	28,4	28,4	210	230	408	472	78,7	74,2	17,3	19,9	4,30	5,31	1,07	1,24
ago-16	145,0	85,4	25,8	25,8	169	153	346	303	89,7	88,8	14,3	12,9	3,11	2,86	0,64	0,64
sep-16	126,8	2,2	25,7	26,5	146	172	291	329	89,8	85,5	12,4	13,6	2,71	3,30	0,60	0,79
oct-16	28,0	0,6	26,4	27,2	166	207	324	426	86,2	78,0	13,4	16,6	3,15	4,58	0,76	1,02
ago-17	107,8	146,8	26,3	25,8	171	164	352	337	88,7	89,1	13,2	13,1	3,10	3,21	0,67	0,65
sep-17	183,6	15,8	25,9	26,4	165	189	340	382	89,0	85,3	13,2	16,5	3,14	3,39	0,65	1,01
oct-17	38,0	25,6	26,6	25,7	191	182	389	375	84,2	84,8	16,9	17,5	3,56	3,40	0,78	1,25
ago-18	90,6	40,0	26,0	26,7	170	168	352	348	88,2	86,8	14,7	15,3	3,13	3,10	0,64	0,70
sep-18	40,8	0,0	26,7	27,3	182	205	375	422	86,1	79,2	16,2	16,8	3,29	4,27	0,73	1,01
oct-18	0,0	0,0	27,3	27,3	204	213	421	441	79,6	75,3	16,9	20,4	4,25	5,74	1,00	1,21
ago-19	55,4	49,2	26,8	27,1	173	191	357	393	84,1	82,3	15,2	16,6	3,08	3,29	0,67	0,76
sep-19	63,8	12,8	27,2	27,5	179	167	370	343	82,2	80,9	16,1	14,9	3,13	2,94	0,77	0,83
oct-19	30,4	0,0	27,4	28,7	164	199	339	410	81,6	74,5	14,8	17,9	2,91	3,89	0,79	1,13
ago-20	276,0	168,0	26,9	27,1	176	173	363	356	83,8	82,5	15,2	15,9	3,15	2,88	0,68	0,79
sep-20	205,0	5,0	27,2	27,5	180	164	370	339	82,1	81,2	16,3	14,6	3,03	4,04	0,77	0,81
oct-20	43,0	0,0	27,5	28,7	163	197	337	406	81,5	75,0	14,8	17,8	3,74	4,14	0,80	1,10
ago-21	184,0	46,0	28,2	27,9	161	177	359	390	88,1	85,6	15,8	15,2	3,11	3,35	0,95	0,98
sep-21	37,0	19,0	27,7	28,1	167	181	363	346	85,1	82,5	15,0	17,8	3,21	3,78	0,92	0,99
oct-21	53,0	0,0	28,0	27,7	173	206	343	413	83,4	76,1	17,3	18,8	3,58	4,62	0,94	1,17
ago-22	239,0	202,0	26,2	25,6	122	94	355	393	81,6	84,7	15,5	15,1	2,49	1,95	0,87	0,69
sep-22	202,0	19,0	25,8	26,9	104	138	370	339	83,4	78,9	15,5	17,3	2,16	3,21	0,76	0,95
oct-22	52,0	9,0	26,7	26,6	133	142	339	410	79,6	76,8	17,4	18,7	3,04	3,47	0,92	1,06
ago-23	205,0	196,0	30,2	29,7	114	105	-	-	82,6	83,7	11,8	10,5	2,48	2,23	0,88	0,79
sep-23	253,0	0,0	30,0	30,5	113	131	-	-	83,2	78,3	11,4	13,8	2,46	3,52	0,82	1,02
oct-23	37,0	12,0	30,2	30,1	127	124	-	-	79,7	77,4	13,1	13,7	3,28	3,31	0,95	1,06
ago-24	588,0	229,0	28,1	27,7	109	105	-	-	88,2	87,1	9,5	10,0	2,44	2,52	0,60	0,62
sep-24	346,0	3,0	28,1	28,4	111	81	-	-	86,3	81,0	10,3	9,8	2,52	2,75	0,67	0,86
oct-24	20,0	85,0	28,5	27,6	92	113	-	-	82,0	81,8	10,6	13,3	2,71	2,43	0,84	0,79



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de Componentes Principales

Los dos primeros ejes del análisis de componentes principales (CP1 y CP2) explicó el 68,6% de la variabilidad total, en donde el primer componente explicó el 47% y el segundo 21,6%. Este análisis indicó que el rendimiento de grano (REND) está relacionado positivamente con el número de plantas al momento de la cosecha (PTM2), la precipitación pluvial acumulada (PPT), así como con la humedad relativa (HR) tanto en el tercer como en la cuarta fase del cultivo (3 y 4). Estos cinco componentes están del mismo lado del gráfico que está el rendimiento de grano (Figura 1). Este resultado indica que a mayor población de plantas, precipitación y humedad relativa mayor es el potencial de rendimiento del cultivo. Por otro lado, variables climáticas como déficit de presión de vapor (VP), evapotranspiración potencial (ET), temperatura promedio (TPR), radiación solar (RA) y ultravioleta (UV) afectan negativamente al rendimiento de grano. Todas estas variables están proyectadas en el lado contrario (ángulo mayor de 45°) del rendimiento de grano, lo que se interpreta que entre menor valor de estas el rendimiento de grano aumenta.

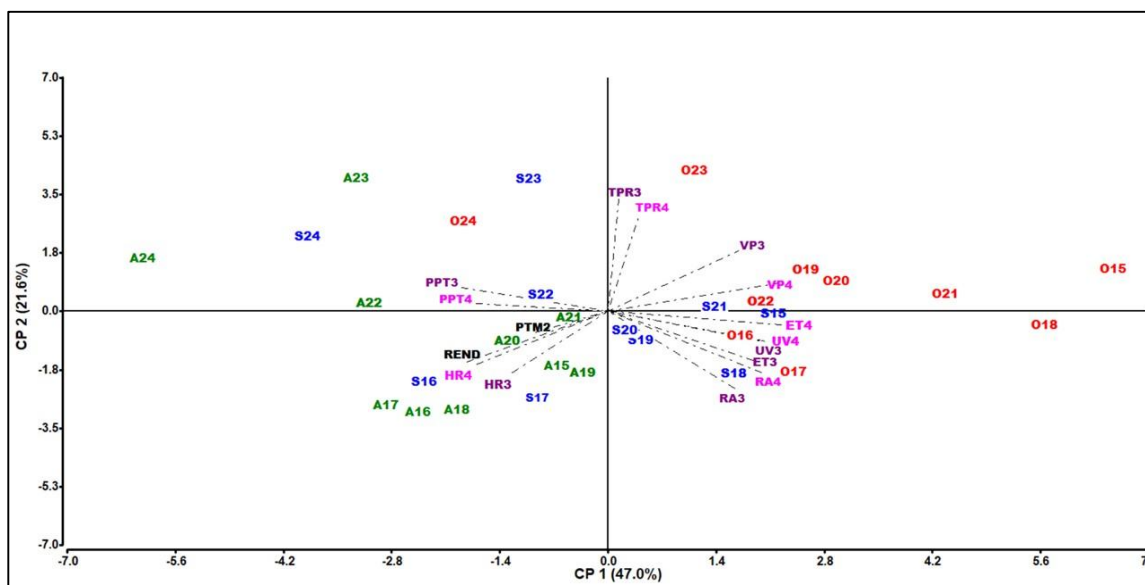


Figura 1. Gráfica Biplot mostrando el resultado de los dos primeros ejes del análisis de componentes principales.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El rendimiento de granos de las siembras de agosto (A) en su totalidad están asociados con el mayor rendimiento de grano, mayor precipitación pluvial y mayor humedad relativa en la tercera y cuarta fase del cultivo. Por el contrario, nueve de los diez años de las siembras de octubre (O) están asociados con bajos rendimientos y altos valores de las variables que están en el lado positivo del primer eje (CP1). Con relación a las fechas de siembra de septiembre (S), la mitad de los años se ubica con alto rendimiento y la otra mitad con bajo rendimiento (Figura 1). Este resultado se puede interpretar que las siembras realizadas en agosto tienen mayor probabilidad de obtener rendimientos altos, mientras que las siembras de octubre son siembras que van a ser afectadas por lo tanto van a tener rendimientos bajos dado que tanto la evapotranspiración, VPD, radiación y temperatura son más alta en las terceras y cuartas fases del cultivo. Las siembras de septiembre son muy variables, y así como hay años en que salen bien, en otros el rendimiento puede verse afectado.

Análisis de Correlación

El análisis identificó que existe una relación positiva y negativa entre las distintas variables con el rendimiento de grano. En algunos casos las variables se repiten en ambos sistemas de producción y en la misma fase. En el sistema de riego la humedad relativa promedio (tercera y cuarta fase) está relacionada positivamente con el rendimiento de grano, mientras que la Energía solar, radiación ultravioleta y VPD se relacionan negativamente en la cuarta fase, es decir que entre mayor es el valor de estas variables, menor es el rendimiento de grano (Cuadro 2).

Por el otro lado, en el sistema de secano además de la humedad relativa promedio, la lluvia está relacionada positivamente, lo que se puede interpretar que entre mayor es el valor de estas variables mayor es el rendimiento de grano esperado. La energía solar, radiación ultravioleta, evapotranspiración y VPD se relacionan negativamente con el rendimiento. El déficit de presión de vapor es la variable que presentó los coeficientes de correlación más altos en ambos sistemas y su relación es inversa o negativa (-0,74 y -0,82, respectivamente). El VPD se ha identificado como un factor cada vez más importante del funcionamiento de las plantas en biomasa terrestres y se ha establecido como un importante contribuyente a la mortalidad de plantas



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

inducida por sequías recientes, independientemente de otros factores asociados con el cambio climático (Grossiord et al., 2020; Dai et al., 2018). Tong et al. (2022) encontraron en términos del efecto de la Radiación, la fracción de evaporación de la superficie del agua tendió a disminuir a medida que la Radiación aumenta. Además, el análisis de trayectoria sugirió que la humedad del suelo, radiación y VPD no solo afectaron directamente la fracción de la evaporación de la superficie, sino que también lo afectaron indirectamente, principalmente a través de la conductancia del dosel y la diferencia de temperatura entre la superficie terrestre y el aire (ΔT).

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento de grano y las distintas variables climáticas en la tercera y cuarta fase del cultivo por sistema de siembra.

Variables climáticas	Secano			Riego		
	51 a 80 dds	81 a 100 dds	51 a 100 dds	51 a 80 dds	81 a 100 dds	51 a 100 dds
Precipitación pluvial	0,64	0,37	0,62	0,52	0,37	0,49
Temperatura promedio	-0,46	-0,31	-0,46	-0,34	-0,31	-0,36
Temperatura máxima	0,01	-0,15	-0,35	0,21	-0,15	-0,19
Radiación solar	-0,29	-0,42	-0,40	-0,21	-0,42	-0,34
Energía Solar	-0,29	-0,66	-0,57	-0,18	-0,69	-0,53
Humedad relativa promedio	0,68	0,77	0,76	0,63	0,72	0,71
Humedad relativa mínima	0,08	0,50	0,64	-0,07	0,38	0,51
Radiación ultravioleta	-0,52	-0,77	-0,55	-0,41	-0,71	-0,51
Evapotranspiración	-0,55	-0,64	-0,62	-0,49	-0,53	-0,54
Déficit de presión de vapor	-0,62	-0,82	-0,72	-0,43	-0,74	-0,56

Al graficar los valores de las distintas variables con el rendimiento de grano se observa que, con excepción de la humedad relativa, al aumentar el valor de todas las variables climáticas se reduce el rendimiento de grano (Figura 2). En todas estas gráficas cuando el valor de la variable es bajo la diferencia en rendimiento entre riego y secano es mínimo. A medida que la variable climática aumenta su valor la diferencia va aumentando. Esto sugiere que cuando las condiciones climáticas son más adversas por el aumento de estas, el cultivo en secano se ve afectado más, ya que, adicional al estrés ambiental el mismo está estresado por el déficit de humedad del suelo producto de la baja precipitación pluvial. Estudios estadísticos de rendimiento del maíz de secano en Estados Unidos, y en otros, lugares han indicado una fuerte respuesta negativa del rendimiento a la acumulación de temperaturas superiores a 30 y una respuesta débil a la lluvia estacional (Lobell et al., 2013).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

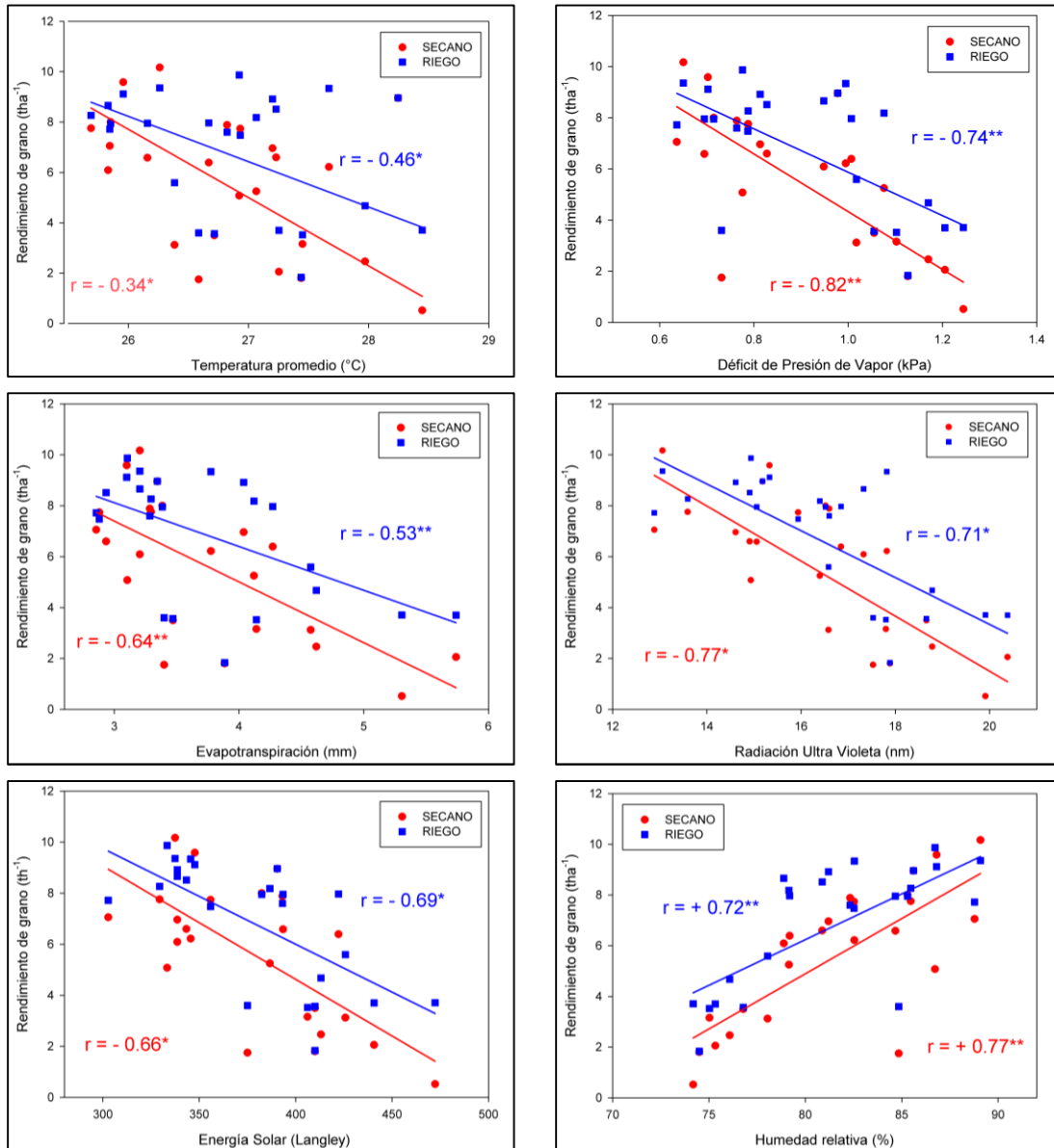


Figura 2. Relación entre el rendimiento de grano y la temperatura promedio en la fase 51 a 80 dds, rendimiento de grano y Déficit de presión de vapor, evapotranspiración potencial, radiación ultravioleta, energía solar y humedad relativa en la fase 81 a 100 dds en el sistema seco y riego suplementario, El Ejido, 2015-2024.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Análisis de Regresión múltiple

Los estadísticos del análisis de regresión múltiple del rendimiento de grano y las distintas variables climáticas en las fases de polinización y llenado de grano (3 fase) y la de secado de grano (fase 4) para los dos sistemas evaluados (secano y riego suplementario) se presentan en el Cuadro 3. Ambos sistemas incluyen a la humedad relativa promedio y VPD en la fase 4. Además de estas dos variables, para el sistema de secano se incluyó a la precipitación pluvial en la fase 3 y la radiación solar promedio en la fase 4. Mientras que en el sistema bajo riego suplementario se incluyeron el VPD en la fase 3 y la precipitación pluvial en la fase 4.

El coeficiente de regresión (R^2) del sistema de secano fue de 0,96, mientras que el del sistema bajo riego suplementario fue de (0,97). En el Cuadro 3 se observa cómo va incrementando el valor del R^2 del modelo al incluirse cada variable. En el modelo para secano se inició con R^2 de 0,85 al incluir la humedad relativa promedio en la fase 4 y termina con 0,96 al incluir la Radiación solar promedio en la fase 4.

La variable VPD es la que presentó el mayor parámetro estimado de valor negativo en ambos sistemas (-10,020 en secano y -11,931 en riego suplementario, lo que indica que a mayor valor de esta variable en el ambiente más se reduce el rendimiento de grano. Hsiao et al. (2019) encontró que el aumento del VPD tuvo un mayor impacto negativo en el rendimiento en comparación con el aumento de las temperaturas. Las temperaturas más cálidas causaron pérdidas de rendimiento de maíz principalmente al acortar la temporada de crecimiento, mientras que una VPD elevado aumentó la pérdida de agua y desencadenó diversas respuestas al estrés hídrico, como la reducción de las tasas fotosintéticas, la disminución del desarrollo del área foliar y la reducción de la duración de la temporada de crecimiento. Por otra parte, Inoue et al. (2021) encontró que una fluctuación drástica del VPD indujo una disminución gradual de la conductancia estomática y, por consiguiente, de la tasa de asimilación de CO_2 durante las mediciones, mientras que una fluctuación moderada del VPD no provocó ninguna reducción de estos parámetros.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cuadro 3. Parámetros estimados del procedimiento de regresión múltiple (Stepwise) entre el rendimiento de grano y las variables climáticas en las fases de 51 a 80 y 81 a 100 dds en los sistemas de riego suplementario y seco.

Variable	Fase (dds)	Parámetro estimado	Prob >F	R ² parcial	R ² del modelo	Pr >F
Secano						
HR	81 a 100	0,095	0,00	0,848	0,85	<,0001
VPD	81 a 100	-10,020	<,0001	0,101	0,95	<,0001
PPT	51 a 80	0,016	0,01	0,005	0,95	0,14
RPR	81 a 100	0,033	0,03	0,010	0,96	0,03
Riego suplementario						
HR	81 a 100	0,180	<,0001	0,917	0,92	<,0001
VPD	81 a 100	-11,931	0,00	0,042	0,96	0,00
PPT	81 a 100	-0,020	0,04	0,005	0,96	0,12
RPR	51 a 80	5,295	0,13	0,004	0,97	0,13

HR = % humedad relativa promedio; VPD = Déficit de presión de vapor, PPT = precipitación pluvial; RPR = Radiación solar promedio.

Por otro lado, al realizar la regresión múltiple del rendimiento de grano con el valor de las variables desde los 51 hasta 100 dds (tercera y cuarta fase) en el sistema de seco, el modelo inicia incluyendo el número de plantas al momento de la cosecha con un R² de 0,84 luego incluye tres variables (precipitación pluvial, VPD y humedad relativa). Por último, saca al número de plantas al momento de la cosecha y el modelo queda con solo las tres variables climáticas, quedando el modelo con un R² de 0,94 (Cuadro 4). En este análisis nuevamente se incluye el VPD como la variable con el mayor impacto negativo en el rendimiento de grano.

En el sistema de riego suplementario (sin estrés hídrico), el modelo solo incluyó dos variables climáticas. La humedad relativa y la energía solar son las variables que están relacionadas con el rendimiento, siendo esta última la que influye de manera negativa en el rendimiento. Estudios previos han demostrado que las plantas desarrolladas bajo alta humedad relativa del aire (HR > 85%) desarrollan estomas defectuosas y, por lo tanto, tienen mayor transpiración y menor tolerancia a la desecación cuando se transfieren a condiciones de HR más bajas y oscuridad (Arve et al., 2017). Se ha encontrado que hay un efecto del VPD en la respuesta de cierre estomático en condiciones de sequía del suelo (Devi & Reddy, 2020). Estos mismos autores encontraron que existe una influencia de la



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

demanda evaporativa en el inicio del cierre estomático del maíz tolerante a la sequía sometido a secado del suelo cuando fueron sometidos a distintos valores de VPD. La sensibilidad del cierre estomático se asoció con el ABA foliar bajo estrés hídrico, pero no bajo condiciones de alta demanda evaporativa, lo que indica mecanismos alternativos de conservación del agua.

Cuadro 4. Parámetros estimados del procedimiento de regresión múltiple (Stepwise) entre el rendimiento de grano y las variables climáticas en la fase 51 a 100 dds en los sistemas de riego y seco.

	Parámetro estimado	Prob>F	R ² parcial	R ² del modelo	Pr >F
Secano					
PTM2			0,844	0,84	<,0001
PPT	0,008	0,07	0,059	0,90	0,00
VPD	-7,974	0,00	0,020	0,92	0,03
HR	0,137	<,0001	0,016	0,94	0,03
PTM2 (Eliminada)			0,003	0,94	0,33
Riego suplementario					
HR	0,223	<,0001	0,913	0,91	<,0001
ESO	-0,032	0,00	0,030	0,94	0,00

PTM2 = Número de plantas al momento de la cosecha; PPT = precipitación pluvial; VPD = Déficit de presión de vapor, HR = % humedad relativa promedio; ESO = Energía solar promedio.

CONCLUSIONES

- Las principales variables climáticas que afectan al maíz son el Déficit de Presión de Vapor y la humedad relativa, radiación solar y la lluvia.
- Las plantas con estrés hídrico son más susceptibles al estrés ambiental causado por otras variables climáticas como el VPD, humedad relativa y radiación solar.
- Las variables en la fase de llenado y secado del grano 81 a 100 dds (4 fase) se correlacionaron con el rendimiento de grano mejor que en la fase de 51 a 80 dds.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo- Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Riego y Drenaje 56. FAO. Roma. ISBN 92-5-304219-2.
- Autoridad Nacional del Ambiente. (2011). *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático: ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. - 2a ed.- Panamá. 170 p. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/pannc2.pdf>
- Arve, L. A., Opstad-Kruse, O. M., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsaether, C., & Torre, S. (2017). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Bheemanahalli, R., Vennam R. R., Ramamoorthy, P., & Reddy, K. R. (2022). Effect of post flowering heat and drought stresses on physiology, yield and quality in maize (*Zea mays* L.). *Plant Stress*, 6, 100106. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100106>
- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: A precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 301-312. https://www.researchgate.net/publication/325068305_Climate_Change_and_Drought_a_Precipitation_and_Evaporation_Perspective
- Devi, M. J., & Reddy, V. R. (2020). Stomatal closure response to soil drying at different vapor pressure deficit conditions in maize. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 714-722. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.023>
- Dong, X., Guan, L., Zhang, P., Liu, X., Li, S., Fu, S., Tang, L., Qi, Z., Qiu, Z., Jin, C., Huang, S., & Yang, H. (2021). Responses of maize with different growth periods to heat stress around flowering and early grain filling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 303,108378. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108378>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

- Gordón-Mendoza, R. (2021). *Manual Técnico: El maíz en Panamá: Características, requerimientos y recomendaciones para su producción en ambientes con alta variabilidad climática*. Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá. 108 p. <http://www.idiap.gob.pa/download/manual-tecnico-el-maiz-en-panama/?wpdmdl=5371>
- Grossiord, Ch., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, P., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550-1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Hsiao, J., Swann, A. L. S., & Kim, S. H. (2019). Maize yield under a changing climate: The hidden role of vapor pressure deficit. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107692. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107692>
- Inoue, T., Sunaga, M., Ito, M., Yuchen, Q., Matsushima, Y., Sakoda, K., & Yamori, W. (2021). Minimizing VPD fluctuations maintains higher stomatal conductance and photosynthesis resulting in improvement of plant growth in lettuce. *Front plant Sci.* 12, 646144. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2021.646144/full>
- Lobell, D. B., Hammer, G. L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M. J., & Schlenker, W. (2013). The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 3, 497-501. <https://doi.org/10.1038/nclimate1832>
- López, J., Way, D. A., & Sadok, W. (2021). Systemic effects of rising atmospheric vapor pressure deficit on plant physiology and productivity. *Global Change Biology*, 27, 1704-1720. <https://doi.org/10.1111/gcb.15548>
- Niu, S., Du, X., Wei, D., Liu, S., Tang, Q., Bian, D., Zhang, Y., Cui, Y., & Gao, Z. (2021). Heat stress after pollination reduces kernel number in maize by insufficient assimilates. *Front. Genet.*, 12, 728166. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.728166>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Ruane, A. C., DeWayne, C.L., Horton, R. M., Gordón, R., McCollum, R., Brown, D., Killough, B., Goldberg, R., Greeley, A. P., & Rosenzweig, C. (2013). Climate change impact uncertainties for maize in Panama: Farm information, climate projections, and yield sensitivities. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 132-145.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.015>

Sanginés de, C. P., Vitasse, Y., Jassey, V. E. J. Butler, A., & Signarbieux, C. (2017). Vapor pressure deficit and extreme climatic variables limit tree growth. *Global Change Biology*, 24, 1108-1122. <https://doi.org/10.1111/gcb.13973>

Tong, B., Guo, J., Xu, H., Wang, Y., Li, H., Bian, L., Zhang, J., & Zou, S. (2022). Effects of soil moisture, net radiation, and atmospheric vapor pressure deficit on surface evaporation fraction at a semi-arid grass site. *Science of the total environment*, 849, 157890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157890>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)