



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DG Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe final de Proyecto de Investigación

DIGI-PUI-004

Informe final de proyecto de investigación

Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación

Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición –PRUNIAN–

**Análisis morfológico-digital de grano y evaluación fenotípica en líneas preseleccionadas de maíz
(*Zea mays* L.) para tolerancia genética a sequía.**

Unidad avaladora: Facultad de Agronomía

4.8.63.0.82

PhD Carlos Alfonso Orozco Castillo

Guatemala, 27 de febrero de 2025



Informe final de Proyecto de Investigación

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Inga. Liuba Cabrera

Coordinadora del Programa Universitario de Investigación

Autores

PhD Carlos Alfonso Orozco Castillo, No. 9322

Ing. Agr. Vinicio Enrique Yol Zamora, No. 20060105

Ing. Agr. Pablo Andres Leal Nájera, No. 20240822

María Alejandra García Echeverría, No. 20241211

Colaboradores:

Prof. PhD. Janka Nôžková

Prof. PhD. Ján Gažo

Prof. PhD. Katarína Ražná

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.63.0.82 en el Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición –PRUNIAN–.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.

Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice General

Índice de tablas	3
Índice de figuras	4
Resumen	5
Palabras clave	5
Abstract.....	6
Keywords.....	6
1. Introducción	7
2. Contexto de la investigación	9
2.1. Delimitación en tiempo	9
2.2. Delimitación espacial	9
2.3. Aspectos geográficos y climáticos	9
2.4. Población meta beneficiada.....	10
3. Revisión de literatura	10
3.1. Maíz (<i>Zea mays</i> L.).....	10
3.2. El Efecto del Fenómeno del Niño-Ocilación del Sur (ENOS) en Guatemala.....	11
3.3. Importancia socio-cultural del maíz en Guatemala.....	12
3.4. Morfología del grano.....	12
3.5. Análisis de componentes Principales (PCA).....	13
3.6. Gráficos multivariantes (BiPlot).....	13
3.7. Mapa de color	13
3.8. Estado del arte	14
4. Planteamiento del problema.....	15
5. Objetivos.....	17



Informe final de Proyecto de Investigación

6.	Hipótesis.....	17
7.	Técnicas.....	17
7.1.	Tipo de investigación.....	17
7.2.	Enfoque y alcance de la investigación.....	18
7.3.	Diseño de la investigación.....	19
7.4.	Población, muestra y muestreo.....	20
7.5.	Técnicas.....	21
7.5.1.	Técnicas de campo.....	21
7.5.1.1.	Estructura de ensayo de campo.....	21
7.5.1.3.	Metodología de toma de datos.....	21
7.5.1.4.	Cronograma de toma de datos.....	22
7.5.2.	Técnicas de laboratorio.....	23
7.5.2.1.	Evaluación morfológica digital de grano.....	23
7.5.2.1.1.	Preparación y toma de fotografías.....	23
7.5.2.1.2.	Segmentación de píxeles.....	23
7.5.2.1.3.	Detección de objetos y extracción de características.....	24
7.5.2.1.4.	Calibración de las medidas a unidades físicas.....	24
7.5.2.1.5.	Exportación y control de calidad de datos.....	24
7.6.	Resumen de las variables o unidades de análisis.....	25
7.7.	Procesamiento y análisis de la información.....	27
8.	Aspectos éticos y legales.....	27
9.	Resultados y discusión.....	28
9.1.	Resultados de campo.....	28
9.2.	Resultados de laboratorio.....	31



Informe final de Proyecto de Investigación

9.2.1.	Fotografías de grano de 25 accesiones evaluadas.....	36
9.3.	Resultados asociados	38
10.	Propiedad intelectual	50
11.	Beneficiarios directos e indirectos.....	50
12.	Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	51
13.	Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND).....	52
14.	Vinculación.....	52
15.	Conclusiones.....	53
16.	Recomendaciones	53
	Referencias	55

Índice de tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Diseño experimental.....	19
Tabla 2. Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.....	25
Tabla 3. Tabla resumen de características fenológicas de 25 accesiones.....	28
Tabla 4. Tabla resumen de análisis morfológico digital de 25 accesiones.....	32
Tabla 5. Tabla de Análisis de Componentes Principales.....	39
Tabla 6. Tabla resumen de Análisis de Componentes Principales	40
Tabla 7. Beneficiarios directos e indirectos de la investigación.....	50
Tabla 8. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	51



Informe final de Proyecto de Investigación

Índice de figuras

Figura	Página
Figura 1. Cronograma de toma de datos a nivel de campo.....	22
Figura 2. Gráfico de comparativo de accesiones en fase vegetativa	29
Figura 3. Grafico comparativo de accesiones en fase mazorca.....	30
Figura 4. Gráfica comparativa entre accesiones por rendimiento	31
Figura 5. Gráfico comparativo de variables morfológicas de grano	33
Figura 6. Gráfico comparativo de área de grano	34
Figura 7. Área limitada de granos de accesión 03.....	34
Figura 8. Gráfico comparativo de relación de aspecto de grano	35
Figura 9. Relación de aspecto de grano de accesión 03	35
Figura 10. Granos de accesiones de 1 a 12.....	36
Figura 11. Granos de accesiones de 13 a 23.....	37
Figura 12. Gráfico de sedimentación de datos	38
Figura 13. Mapa de calor de variables agronómicas y de grano del ensayo realizado.....	41
Figura 14. Gráfico de variables con mayor significancia según PCA.....	42
Figura 15. Gráfica de correlación de variables mediante coeficiente de Jaccard.....	43
Figura 16. Gráfico multivariante de componentes principales 1 y 3.....	44
Figura 17. Gráfica multivariante de componentes principales 1 y 2	45
Figura 18. Gráfica multivariante de componentes principales 2 y 4.....	46
Figura 19. Granos de accesiones sobresalientes en BiPlot de componentes 2 y 4	48
Figura 20. Gráfica multivariante de componentes principales 1 y 5	49



Informe final de Proyecto de Investigación

Resumen

La agricultura en Guatemala, especialmente el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), enfrenta desafíos significativos debido a la creciente incidencia de sequías prolongadas y cambios climáticos adversos, como el fenómeno El Niño (Rivera, 2016; Alfaro, 1999). El maíz es fundamental para asegurar la seguridad alimentaria y la economía rural (ICTA, 2020). En regiones como el Corredor Seco, los agricultores han experimentado pérdidas de cosechas de hasta un 80% debido a este fenómeno (CONRED, 2015), lo que compromete la seguridad alimentaria y la producción.

Para abordar estos problemas, es esencial el uso de materiales de maíz mejorados que sean tolerantes a la sequía. Este estudio utilizó técnicas de mejoramiento genético y análisis morfológico digital de semillas para identificar variedades con mayor potencial de adaptación a condiciones de sequía. El análisis morfológico digital, mediante la identificación de características de interés del grano dentro del contexto de sequía y la seguridad alimentaria. Por otro lado, la evaluación fenotípica permitió identificar características favorables de planta y mazorca y su desarrollo en condiciones de secano, con impacto significativo a la resiliencia agrícola de los habitantes del Corredor Seco (Grillo, 2017; Fu, 2023).

En base a los análisis correlacionales mediante gráficas multivariantes (BiPlot) de los componentes principales resultantes, se identificaron las accesiones 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 21 y 23; mismas que presentan características más favorables en relación con la tolerancia genética a sequía.

Palabras clave

1. Sequía	2. <i>Zea mays</i> L.	3. Tolerancia genética a sequía	4. Análisis morfológico de grano	5. Evaluación fenotípica
-----------	-----------------------	---------------------------------	----------------------------------	--------------------------



Informe final de Proyecto de Investigación

Abstract

Agriculture in Guatemala, particularly maize cultivation (*Zea mays L.*), faces significant challenges due to the increasing incidence of prolonged droughts and adverse climatic changes, such as the El Niño phenomenon (Rivera, 2016; Alfaro, 1999). Maize is essential for food security and the rural economy (ICTA, 2020). In regions such as the Dry Corridor, farmers have experienced crop losses of up to 80% as a result of this phenomenon (CONRED, 2015), compromising both food security and production.

To address these issues, the use of improved maize materials tolerant to drought is essential. This study employed genetic improvement techniques and digital morphological analysis of seeds to identify varieties with greater potential for adaptation to drought conditions. Digital morphological analysis enabled the identification of grain traits of interest within the context of drought and food security. In addition, phenotypic evaluation allowed the identification of favorable plant and ear characteristics and their development under rainfed conditions, with significant impact on the agricultural resilience of inhabitants of the Dry Corridor (Grillo, 2017; Fu, 2023).

Based on correlational analyses using multivariate graphs (BiPlot) of the resulting principal components, accessions 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 21, and 23 were identified as presenting more favorable traits related to genetic drought tolerance.

Keywords

Drought, *Zea mays L.*, Genetic drought tolerance, Grain morphological análisis, Phenotypic evaluation



Informe final de Proyecto de Investigación

1. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es una especie agrícola de suma relevancia mundial, debido a su importancia económica, y también por su diversidad genética y adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas. En Latinoamérica, el cultivo y consumo de maíz están profundamente arraigados en las tradiciones culturales de muchas comunidades indígenas (Fuentes, 2005; Albán, 2002).

En países como Guatemala, el maíz es fundamental para la preservación de la biodiversidad agrícola y la seguridad alimentaria. Según el ICTA (2019), en el año 2020, en el país se generaron, aproximadamente, 1.9 millones de toneladas de maíz en 870 mil hectáreas, donde se llegó a un rendimiento promedio de 2,154 kg/ha. Sin embargo, esta producción no llegó a cubrir la demanda interna, teniendo que importar el grano. La sequía en Guatemala está ligada al ENOS El Niño-oscilación del sur (INSIVUMEH, 2017).

Además, el cambio climático está incrementando la severidad y la reiteración de estos eventos, impactando particularmente al Corredor Seco, que abarca partes del norte y centro del país. Esta región es particularmente vulnerable debido a su clima semiárido (Mesa Técnica Agroclimática [MTA], 2023). Según la SESAN (2020), desde 2012, Guatemala ha enfrentado problemas de sequía en siete de los últimos ocho años debido a canículas extendidas y efecto del fenómeno del niño, para las cuales aún no se tienen medidas de prevención ni mitigación. El episodio más crítico reciente fue en 2018 en el Corredor Seco, cuando una canícula prolongada afectó hasta el 70% de la siembra de frijol y maíz en esta región, comprometiendo la seguridad alimentaria de 2.2 millones de personas (FAO, 2020).

Utilizar variedades de maíz que posean tolerancia a condiciones de estrés hídrico, generando un incremento de rendimiento y, por tanto, contribuyendo a la seguridad alimentaria del país (MTA, 2023). En este contexto, el análisis morfológico digital de las semillas de maíz se presenta como una herramienta innovadora y eficiente para la caracterización y mejoramiento de este cultivo (Grillo, 2017; Fu, 2023).



Informe final de Proyecto de Investigación

Estas características son fundamentales para la identificación de variedades, la optimización de la siembra y cosecha; por otro lado, utilizar semillas de alta calidad y el uso de tecnologías digitales y algoritmos avanzados facilita el análisis de datos a gran escala y la recopilación de los mismos, mejorando la precisión y haciendo eficiente los métodos tradicionales, y optimizando recursos al reemplazar métodos destructivos (Saccomanno, 2020; Geetha, 2011; Smykalova, 2011).

Este proyecto tuvo como objetivo principal desarrollar un sistema de análisis morfológico digital para la caracterización detallada de las semillas de maíz. Para ello, se utilizaron técnicas de procesamiento de imágenes, con el fin de identificar y clasificar los 25 diferentes materiales de maíz colectados por el ICTA. Al mismo tiempo, se realizó una evaluación fenotípica de dichos materiales en condiciones de agricultura de secano en San José, La Máquina, Suchitepéquez.



Informe final de Proyecto de Investigación

2. Contexto de la investigación

2.1. Delimitación en tiempo

El proceso investigativo se realizó en 11 meses, desde febrero a diciembre 2025; teniendo dos fases dentro de la ejecución técnica de los objetivos: fase de campo y fase de laboratorio.

2.2. Delimitación espacial

La fase de campo se ejecutó en el departamento de Suchitepéquez en el municipio de San José, La Máquina; donde se ejecutó un ensayo de campo de maíz como evaluación fenotípica de 25 accesiones maíz nativas del corredor seco de Guatemala, previamente preseleccionadas, para fitomejoramiento enfocado a la tolerancia genética a sequía. Esta se realizó mediante un ensayo experimental con diseño Alfa Lattice.

La fase de laboratorio se realizó en el Laboratorio de Genética Molecular y Cultivo de Células y Tejidos, UVIGER, USAC con colaboración de la Universidad Eslovaca de Agricultura en Nitra (SUA). Esta fase consto de una evaluación morfológica digital de grano sobre los 25 materiales anteriormente mencionados, con la finalidad de identificar variaciones morfológicas de importancia en el grano relacionadas a la tolerancia genética a sequía.

2.3. Aspectos geográficos y climáticos

El municipio de San José La Máquina, es relativamente reciente dentro del departamento de Suchitepéquez, con una extensión de 147 km² y está ubicado dentro de la Planicie Costera del Pacífico. Posee una economía que predomina el sector agropecuario, siendo totalmente dependiente a la estacionalidad climática y la disponibilidad hídrica edáfica y superficial (Contraloría General de Cuentas, 2024).

En relación a las características climáticas, presenta un régimen tropical con estacionalidad marcada; posee temperaturas medias anuales de 21 a 33° Celsius y alcanzando temperaturas máximas entre 35 a 36° Celsius en época seca. Posee una precipitación anual dentro del rango



Informe final de Proyecto de Investigación

de 2,500 a 3,000 mm, misma que se concentra en la estación lluviosa (junio a octubre) (Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia, 2019).

2.4. Población meta beneficiada

Los resultados de esta investigación benefician a distintos grupos meta de forma indirecta y directa. Indirectamente beneficia a la población guatemalteca y a la humanidad, pues este estudio permite el conocimiento específico de germoplasma de maíz nativo de Guatemala, país (junto con México) de origen de este cultivo con gran importancia mundial, con la orientación directa al fitomejoramiento de este material con énfasis en la tolerancia genética a sequía, específica para el Corredor seco de Guatemala; región del país donde predomina la inseguridad alimentaria, la pobreza y la migración.

De forma directa, esta investigación beneficio a los agricultores del municipio de San José La Máquina, Suchitepéquez, esto mediante la impartición de charlas sobre el cambio climático y las alternativas para la agricultura moderna; además de la participación continua en los procesos técnicos de la investigación.

3. Revisión de literatura

3.1. Maíz (*Zea mays* L.)

Este grano ha sido un elemento de suma importancia a nivel Latinoamericano, debido a su importancia cultural e histórica, durante siglos. Este es un alimento básico, pero también un símbolo de divinidad y fertilidad para las antiguas civilizaciones mesoamericanas como los aztecas, mayas e incas. El maíz es la base de la vida de los guatemaltecos, no solo como alimento básico, sino también como parte integral de su identidad cultural y económica (Chavez, 2015). En Guatemala, el maíz es consumido diariamente en diversas formas y representa aproximadamente el 40% de las calorías consumidas de la población del país con un consumo anual per cápita de aproximadamente 120 kilogramos, por lo que el maíz el maíz es crucial para la seguridad alimentaria. Produciendo al año, aproximadamente, 1.8 millones de toneladas, Guatemala es uno de los principales productores en Centroamérica. Además,



Informe final de Proyecto de Investigación

el cultivo de maíz emplea a miles de agricultores y es un pilar económico para muchas comunidades. La importancia del maíz subyace de la alimentación, pero posee un contexto histórico, ya que también es utilizado en rituales y celebraciones tradicionales, subrayando su profundo significado cultural (Erenstein *et al.*, 2022).

3.2. El Efecto del Fenómeno del Niño-Ocilación del Sur (ENOS) en Guatemala

Este fenómeno se caracteriza por el calentamiento anómalo del océano Pacífico (Bojórquez-Serrano *et al.*, 2020). En Guatemala, este fenómeno posee injerencia significativa en la manera en que realiza la agricultura históricamente. Durante los episodios del ENOS, se genera un decrecimiento en la precipitación, lo que provoca sequías severas en varias regiones del país (INDE, 2023). Estos fenómenos perjudican la disponibilidad de este líquido para uso antropológico como agrícola, incrementando el riesgo de inseguridad alimentaria y problemas de salud pública (Bojórquez-Serrano *et al.*, 2020).

Además, El Niño también puede alterar los patrones de lluvia, generando periodos de lluvias intensas seguidos de largos periodos secos (MAGA, 2002) (MTA, 2023). Las fluctuaciones en el clima también afectan la producción de energía hidroeléctrica, ya que la disminución de la precipitación reduce el caudal de los ríos, impactando la generación de electricidad. En la agricultura afecta especialmente a quienes se dedican a la producción de secano porque requieren de precipitación como fuente de riego, esto especialmente afecta a la población más vulnerable que produce en el corredor seco guatemalteco, donde Pons (2018) predice en 2030 que el avance y efecto del cambio climático sea más agresivo pasando de pérdidas del 57% al 100 % de pérdidas (Hannah, *et al.* 2018). El impacto de El Niño no se limita solo a la agricultura y la energía. También se observan efectos en la pesca, debido al calentamiento de las aguas marítimas puede reducir la disponibilidad de nutrientes en el océano, afectando las poblaciones de peces, lo que puede tener consecuencias devastadoras para los ecosistemas locales (Bardales *et al.*, 2019) (MARN, 2021).



Informe final de Proyecto de Investigación

3.3. Importancia socio-cultural del maíz en Guatemala

El maíz es fundamental tanto económica como socioculturalmente en Guatemala, tanto que, en 2020, el país ocupó el puesto 49 en producción mundial de maíz, con 1,870,000 toneladas (McCormick, 2020). En 2018, se sembraron aproximadamente 1,074,058 hectáreas, con un rendimiento de 33.96 quintales/mz (ICTA, 2019). Por otro lado, la producción nacional, de dicho grano, no llega a cubrir la demanda interna; generando la importación de este grano, principalmente debido a la sequía en el “Corredor Seco”, que afecta gravemente los cultivos (ICTA, 2019) (Morales, 2018).

Socioculturalmente, el maíz es el corazón de la cultura guatemalteca y mesoamericana. Su importancia trasciende lo económico, siendo un pilar en la dieta y tradiciones del país. La industrialización, el capitalismo y la globalización han facilitado su expansión, manteniendo su relevancia en la sociedad moderna (ICTA, 2019) (Mueller, 2011). El consumo de maíz está profundamente arraigado en el imaginario colectivo, presente en diversas formas en las mesas de la mayoría de los guatemaltecos (ICTA, 2019).

3.4. Morfología del grano

Las características morfológicas fundamentales a evaluar en el maíz, a nivel de semilla, incluyen tamaño, forma, color y textura de grano; la forma y el tamaño son cruciales para la uniformidad en la siembra y el desarrollo de las plantas; el color del grano, que puede variar desde blanco hasta amarillo, negro y rojo, siendo un parámetro valioso para la clasificación y selección de variedades; la textura del grano, que puede ser dura, semidura o blanda, influye en su renuencia a enfermedades y plagas, así como en su capacidad de almacenamiento, además, es esencial evaluar la integridad del pericarpio, el endospermo y el germen, ya que estos componentes afectan el vigor y la viabilidad de la semilla (Salvador-Reyes *et al.*, 2021) (Bjelková *et al.*, 2012).



Informe final de Proyecto de Investigación

3.5. Análisis de componentes Principales (PCA)

Este análisis constituye una herramienta estadística con gran relevancia dentro del fitomejoramiento, pues permite sintetizar y organizar variables genotípicas y fenotípicas de una población; permitiendo identificar rasgos que explican la mayor proporción de la variabilidad total, facilitando la selección de accesiones que presenten características deseables y definiendo criterios de mejoramiento más eficientes (Das, 2017).

El PCA transmite una visión integral de la relación entre variables, al reducir la complejidad de los datos multivariante, fortaleciendo metodología de toma de decisiones en programas de selección y cruzamiento; en ese sentido, el PCA contribuye a la optimización de selección y mejora la estrategia de orientación del fitomejoramiento hacia la sostenibilidad (Das, 2017).

3.6. Gráficos multivariantes (BiPlot)

Este tipo de gráficos son representaciones derivadas del análisis de componentes principales, mismos que permiten observar, en un mismo plano, la distribución de los individuos estudiados bajo la condición de variables consideradas; mediante esta doble visualización, se facilita la visualización e identificación de agrupamiento de accesiones y comprender la injerencia de cada característica en la contribución de la variabilidad total de la población (Dehghani *et al.*, 2008).

3.7. Mapa de color

Este tipo de gráficos son una herramienta complementaria a los análisis multivariantes, permitiendo representar la distribución observada de los individuos, mediante una escala cromática que está asociada a una variable cuantitativa de interés; su importancia radica en el agregado de dimensionalidad interpretativa, permitiendo la fácil identificación de tendencias, gradientes y agrupamientos (Hidalgo *et al.*, 2013).



Informe final de Proyecto de Investigación

3.8. Estado del arte

Según Razná *et al.*, (2022), Algunas semillas de plantas con flores producen mucílago hidrofílico en su cubierta, lo que ayuda en la hidratación, protección y desarrollo de la semilla. Es posible analizar la composición y función del mucílago e identificar variaciones según la especie y el genotipo utilizando como herramienta el análisis morfológico digital y el procesamiento de las imágenes obtenidas. Fue de relevancia realizar este estudio porque demuestra una descripción más rápida y precisa de las semillas, especialmente semillas que tienen potencial en agroindustrial y alimenticio.

Otra investigación donde también se demostró la utilización de análisis digital, es la presentada por Ogunniyan *et al.* (2021), evaluó la variabilidad e interdependencia del rendimiento de grano, las características morfométricas y el vigor de semillas en híbridos de maíz de maduración temprana, los datos de características morfométricas y el vigor se colectaron por medio de análisis digital facilitando el tiempo y evitando el uso de medios destructivos. Se evaluaron semillas de 75 híbridos en cuatro réplicas dispuesto en un ensayo de campo en Ibadan, Nigeria. Se evaluaron los datos de rendimiento, dimensiones y calidad de las semillas mediante análisis de varianza y coeficientes de correlación. Se observaron distinciones anómalas ($P < 0.001$) en rendimiento de grano, dimensiones y vigor de las semillas. Respecto al rendimiento obtenido, se realizó una correlación con varias características de las semillas, y el estudio de elementos principales (PC) destacó la importancia de estas características en la mejora del rendimiento del grano. Las características morfométricas y de vigor de las semillas identificadas pueden ser aprovechadas por las empresas de semillas para innovar en la producción de semillas.

En relación a la importancia de realizar una evaluación fenotípica materiales nativos, Kanul *et al* (2022), mostró en sus investigaciones que, para mejorar genéticamente el tomate, se evaluó la diversidad de 20 accesiones, a nivel morfológico y agronómico, de tomate nativo de las regiones del sur mexicano. Realizar este tipo de estudios en campo permitió identificar seis poblaciones prometedoras con características destacadas como peso y tamaño de fruto,



Informe final de Proyecto de Investigación

rendimiento y estructuras florales. Estas poblaciones son valiosas para la conservación y el mejoramiento genético. Este estudio resalta la importancia de evaluar esa relación de genotipo y ambiente en campo y validar los resultados.

4. Planteamiento del problema

La agricultura en Guatemala, especialmente el cultivo de maíz, posee desafíos ligados a la creciente incidencia de sequías prolongadas y cambios climáticos adversos, como el aumento de eventos del ENOS, que lo que supone un incremento en estas condiciones para el país (Rivera, 2016; Alfaro, 1999). El maíz, siendo un cultivo básico y esencial para potenciar la economía rural y mitigar la inseguridad alimentaria, se ve afectado por los periodos de sequía (ICTA, 2020). En regiones como el Corredor Seco de Guatemala, los agricultores han experimentado pérdidas de cosechas de hasta un 80% debido a la sequía (CONRED, 2015). Esta situación no solo compromete la producción de alimentos, sino que también obliga a muchas familias a migrar en busca de mejores oportunidades, exacerbando problemas sociales y económicos.

Zacapa es uno de los departamentos de Guatemala que ocupa el 5% de la Región “muy seca” del país; esta región, junto a la región seca, comprende el Corredor Seco del país (CONRED, 2016; MARN, 2021). Esta área posee una deficiencia hídrica la mayor parte del año, además de registrar las temperaturas más altas del país, lo que ha llevado a un cambio de zona semiárida a zona árida, afectando a los agricultores de subsistencia y, en consecuencia, afectar la seguridad alimentaria (Pons, 2018). En particular, la Estación La Fragua registró en 2024 las temperaturas más altas de la década y el periodo más prolongado de sequía debido a la canícula extendida y una ola de calor que afectó varios departamentos (INSIVUMEH, 2024). Por lo tanto, esta zona es, altamente vulnerable a estos fenómenos, con, aproximadamente el 78% del territorio clasificado con amenaza “alta” a “extremadamente alta”, lo que concuerda con la alta vulnerabilidad del departamento de Zacapa y otros departamentos del país (Gándara, 2018).



Informe final de Proyecto de Investigación

Para abordar este problema, es esencial el uso de materiales de maíz mejorados que sean tolerantes a la sequía. Estos materiales genéticamente mejorados tienen el potencial de mantener rendimientos aceptables bajo condiciones de estrés hídrico, ofreciendo una solución viable a esta circunstancia del cultivo propensa al estrés hídrico (Brizuela *et al*, 1996; Castañón *et al*, 2000). Sin embargo, la adopción de estos materiales mejorados no ha sido suficientemente amplia, en parte por la falta de recursos y conocimientos entre los agricultores. El mejoramiento genético en Maíz permite crear materiales que respondan las necesidades de los agricultores del país, con esa finalidad se utilizaron dos técnicas de mejoramiento genético en este estudio; fase de campo para validar la preselección de 25 accesiones, por medio de una evaluación fenotípica, y el análisis morfológico digital de los granos de maíz; esta última como herramienta innovadora y crucial. El análisis morfológico digital permitió una evaluación precisa y rápida de las cualidades físicas y estructurales de las semillas, facilitando la identificación de aquellas con mayor potencial de adaptación a condiciones de sequía.

La implementación de tecnologías de análisis digital puede acelerar el proceso de mejoramiento y distribución de semillas mejoradas, contribuyendo significativamente a la resiliencia agrícola ante efectos adversos.



Informe final de Proyecto de Investigación

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Describir la morfología del grano por medios digitales y el fenotipo de 25 líneas preseleccionadas de maíz (*Zea mays* L.) para tolerancia genética a sequía.

5.2. Objetivos específicos

- 1) Analizar por medios digitales, características morfológicas de la semilla de maíz (*Zea mays* L.).
- 2) Evaluar el fenotipo de 25 materiales preseleccionados de maíz en condiciones de agricultura de secano en San José, La Máquina, Suchitepéquez.
- 3) Describir la relación de resultados obtenidos en fase de campo y fase de laboratorio respecto a rendimiento en condiciones de sequía.

6. Hipótesis

Las accesiones nativas de maíz preseleccionadas, presentan características fenotípicas y de calidad de grano, relacionada a posible tolerancia a sequía bajo condiciones del Corredor Seco de Guatemala.

7. Método

7.1. Tipo de investigación.

El ensayo se estableció con naturaleza aplicada y experimental, enfocándose en la identificación de variedades promisorias de maíz que presenten características fenotípicas y de calidad de grano con posible capacidad de soportar la sequía. Este estudio experimental tuvo como objetivo observar cómo responden estas variedades al estrés hídrico en condiciones de agricultura de secano. Para lograrlo, se utilizaron diversos métodos específicos:



Informe final de Proyecto de Investigación

- **Diseño Experimental:** Se utilizó un diseño alfa latices, ya que, es el recomendado para experimentos agrícolas de evaluación de múltiples tratamientos (en este caso, los 25 materiales de maíz y dos testigos) de manera eficiente y controlada.
- **Evaluaciones Fenotípicas:** Se realizaron mediciones periódicas de características fenotípicas como del desarrollo vegetativo como número de hojas, altura de planta, altura de mazorca, número de nudos, entre otras. También se describieron características de mazorca. Estas mediciones contribuyeron a identificar las respuestas fisiológicas al estrés hídrico.
- **Análisis digital de grano:** Se utilizaron herramientas de análisis digital para evaluar la calidad del grano, incluyendo parámetros como tamaño, peso, forma, color, entre otras.
- **Análisis de Datos:** se realizaron mediante métodos estadísticos que identificaron patrones y correlaciones. Esto incluyó los análisis descriptivos, asociativos, predictivos y explicativos como matrices y dendrogramas.

La combinación de estos métodos permitió una evaluación integral en los materiales de maíz preseleccionados, proporcionando información valiosa para futuras investigaciones y aplicaciones agrícolas.

7.2. Enfoque y alcance de la investigación.

La investigación se centró en la identificación de accesiones de maíz promisorias, mismas que posean características fenotípicas y de calidad de grano capaces de tolerar la sequía. Este estudio se realizó con un enfoque mixto, analizando datos cualitativos y cuantitativos. Este estudio se complementó con evaluaciones de campo para medir la tolerancia a la sequía.

La investigación abarcó varios enfoques: iniciando con una descripción primaria, seguida de análisis asociativos o correlacionales, luego un enfoque predictivo y, finalmente, un enfoque explicativo.

Informe final de Proyecto de Investigación

7.3. Diseño de la investigación.

La investigación, en su fase de campo, aplicó un diseño de Alfa lattices, ya que es una técnica estadística utilizada en experimentos agrícolas para evaluar múltiples tratamientos.

A continuación, se describe la distribución de las 25 accesiones de maíz en un diseño de alfa lattices:

- 1) **Número de bloques y sub-bloques:** en un diseño de alfa lattices, los tratamientos se distribuyen en bloques incompletos. Para 25 accesiones, se asignaron 5 bloques con 5 sub-bloques cada uno, como se muestra en la tabla 1.
- 2) **Tratamientos:** Las 25 accesiones de maíz se asignaron aleatoriamente a los sub-bloques dentro de cada bloque. Esto asegura que cada accesión se pruebe en diferentes condiciones y se minimicen los efectos de variabilidad ambiental.
- 3) **Análisis de datos:** Una vez que recolectados los datos en los libros de campo, se analizaron utilizando software estadístico “R”.

Tabla 1

Diseño experimental

Sub bloque 1	1, 2, 3, 4, 5
Sub Bloque 2	6, 7, 8, 9, 10
Sub Bloque 3	11, 12, 13, 14,
Sub bloque 4	16, 17, 18, 19,
Sub bloque 5	21, 22, 23, 24,
Sub bloque 1	6, 7, 8, 9, 10
Sub Bloque 2	11, 12, 13, 14,
Sub Bloque 3	16, 17, 18, 19,
Sub bloque 4	21, 22, 23, 24,
Sub bloque 5	1, 2, 3, 4, 5
Sub bloque 1	11, 12, 13, 14,
Sub Bloque 2	16, 17, 18, 19,
Sub Bloque 3	21, 22, 23, 24,
Sub bloque 4	1, 2, 3, 4, 5
Sub bloque 5	6, 7, 8, 9, 10
Sub bloque 1	16, 17, 18, 19,
Sub Bloque 2	21, 22, 23, 24,
Sub Bloque 3	1, 2, 3, 4, 5
Sub bloque 4	6, 7, 8, 9, 10
Sub bloque 5	11, 12, 13, 14,
Sub bloque 1	21, 22, 23, 24,
Sub Bloque 2	1, 2, 3, 4, 5
Sub Bloque 3	6, 7, 8, 9, 10
Sub bloque 4	11, 12, 13, 14,
Sub bloque 5	16, 17, 18, 19,
Bloque 1	
Bloque 2	
Bloque 3	
Bloque 4	
Bloque 5	

Nota. Se establece por cada bloque, un total de 5 sub bloques; esto con la finalidad de reducir el error estadístico provocado por el efecto borde y las variaciones nutrimentales y físicas del suelo del ensayo de campo.



Informe final de Proyecto de Investigación

7.4. Población, muestra y muestreo.

El cálculo del tamaño de muestra del ensayo, en su fase de campo, respeto el diseño de alfa latices e implica varios factores estadísticos que aseguraron resultados significativos y representativos. Seguidamente, se describen los parámetros aplicados para el ensayo.

- Nivel de confianza: se tomó utiliza un 95% de nivel de confianza.
- Poder del estudio: se estableció en 80% o 90%.
- Tamaño del efecto: la diferencia mínima que se desea detectar entre los tratamientos.
- Variabilidad: la desviación estándar de las mediciones.

Fórmula básica:

$$\eta = ((Z\alpha/2+z\beta) / \Delta) * \sigma^2$$

Donde:

(n) = tamaño de muestra.

(Z ($\alpha/2$)) = valor crítico del nivel de confianza.

(Z (β)) = valor crítico del poder del estudio.

(\Delta) = tamaño del efecto.

(\delta) = desviación estándar.

Ajustes adicionales:

- **Bloques y sub-bloques:** al ser un diseño de alfa latices, los tratamientos se distribuyeron en bloques incompletos, Esto requirió un ajuste adicional en el establecimiento del cálculo de tamaño de muestra.
- **Pérdidas esperadas:** Se consideró un porcentaje adicional para compensar las posibles pérdidas de datos o muestras.



Informe final de Proyecto de Investigación

7.5. Técnicas.

7.5.1. Técnicas de campo

7.5.1.1. Estructura de ensayo de campo

El ensayo se realizó mediante el diseño experimental Alfa lattice, distribuido en cinco bloques con cinco sub bloques, cada uno; integrados por cinco accesiones diferentes; dando un total de 25, distintas, accesiones de maíz evaluadas, con cinco repeticiones cada una.

7.5.1.2. Variables estudiadas

Para la evaluación fenotípica de las 25 accesiones estudiadas de maíz, se registraron variables que poseían congruencia teórica científica y con fundamentos agronómicos, para capturar las características relacionadas con la tolerancia genética a sequía. A continuación, se presentan las variables estudiadas: Ancho de hoja (AH), largo de hojas (NTH), No. De nudos (NN), altura de planta (AP), altura de mazorca (AM), diámetro de tallo (\emptyset T), longitud de parte ramificada (LPM), Longitud de panícula (LP), Diámetro de mazorca (\emptyset M), No. De hileras (NH), No. Granos (NG), Diámetro de olote (DO), Longitud de mazorca (LM) y Peso de 1,000 granos (P1000G).

Posteriormente, estas variables se analizaron mediante metodología estadística multivariante, con la finalidad de observar las, posibles, correlaciones entre las mismas enfocado en la tolerancia genética a sequía.

7.5.1.3. Metodología de toma de datos

Establecidas las matrices de toma de datos y el cronograma de toma de datos, se realizó la toma de los mismos mediante observación directa y registro sistematizado en el ensayo experimental, manteniendo los protocolos estandarizados, garantizando la fiabilidad de los datos y su reproducibilidad. Las evaluaciones se realizaron mediante instrumentos básicos de campo (Cinta métrica, estadal topográfico, calibrador vernier y reglas graduadas), asegurando la uniformidad en la metodología y la precisión de cada registro de dato.

Informe final de Proyecto de Investigación

Los datos se registraron en libros de campo, previamente diseñados, con la finalidad de mantener un control ordenado y evitar sesgos en la captura de información.

Posterior a la toma de datos del ensayo de campo, se realizó la toma de datos de postcosecha, esto se realizó con una muestra representativa de cada accesión. Se seleccionaron lotes de mazorcas, previamente acondicionadas, a las cuales se les tomó los datos morfológicos pertinentes. Seguidamente, se desgranaron las mazorcas y se le tomaron las medidas a nivel manual.

7.5.1.4. Cronograma de toma de datos

Figura 1

Cronograma de toma de datos a nivel de campo

Etapa fenológica	Pre floración	Floración	Post floración	Estado lechoso	2 días pre cosecha	Cosecha	Post cosecha	Grano y mazorca
Semanas post siembra	4 S DS	5-7 DS (R1)	6-7 DS (R2)	12 S DS (R5)	13 S DS (Maduro)	15-16 S DS	17 S DS	18-19 S DS
Variables	Altura Parcial	MCLL	HT	AP	% AR	COSECH A	CPV	DO
		DFM	AH	AM	% AT			ØM
		DFP	LH	LP				GH
		EF	NN	FLLJ				IP
		EM	EF					FM
		P	EM					P1000G
			P					REND

Nota. El cronograma establece las variables que se tomaron en cada etapa fenológica del cultivo de maíz.



Informe final de Proyecto de Investigación

7.5.2. Técnicas de laboratorio

7.5.2.1. Evaluación morfológica digital de grano.

Para la evaluación precisa y correcta de granos mediante técnicas digitales, se deben realizar los siguientes pasos:

7.5.2.1.1. Preparación y toma de fotografías

El proceso de análisis inició en la preparación de las fotografías a utilizar, etapa que es crítica para garantizar resultados de calidad, se estableció un fondo homogéneo, azul mate, que evita los reflejos y sombras ocasionales; la iluminación se estableció de forma difusa y constante, asegurando la visibilidad de los contornos y la nula variación cromática; los granos se colocaron separados, evitando la interpretación de fusión de objetivos. Las fotografías se establecieron en formato TIFF o PNG (De Medeiros *et al.*, 2020).

7.5.2.1.2. Segmentación de píxeles

Posteriormente, se realizó la segmentación en el programa *Ilastik*, mediante la clasificación de píxeles; se definieron dos clases de entrenamiento, grano y fondo, seguidamente de entrenamiento del programa mediante ejemplos representativos de distintas zonas de la imagen, tanto del interior del grano como de los bordes, generando que el modelo estadístico aprenda a diferenciar correctamente las texturas (*Machine learning*) (De Medeiros *et al.*, 2020).

Luego se activaron los filtros multiescala que capturan información de suavizado, bordes y patrones de textura, y se ajustó, iterativamente, el mapa de predicción hasta obtener la separación clara entre el grano y el fondo. Finalmente, se estableció el umbral de probabilidad, con la finalidad de binarizar la clase de grano y realizar correcciones automáticas (De Medeiros *et al.*, 2020).



Informe final de Proyecto de Investigación

7.5.2.1.3. Detección de objetos y extracción de características

Con la máscara binaria, se prosiguió con la identificación de los objetos y la toma de características. Cada grano se definió como un objeto independiente mediante componentes conectados, se filtraron aquellos que no cumplen con un tamaño mínimo para evitar ruido. En este punto, se establecieron las métricas morfológicas de interés (área, perímetro, ejes mayor y menor, relación de aspecto, circularidad, redondez, solidez y diámetros de Feret); estas variables permitieron describir, de forma integral, la forma y tamaño de grano (De Medeiros *et al.*, 2020).

7.5.2.1.4. Calibración de las medidas a unidades físicas

Posteriormente se realizó la calibración correspondiente a las medidas utilizadas, mediante la referencia de escala que se incluyó en las imágenes; de esta manera, los valores métricos se expresan en milímetros o milímetros cuadrados, asegurando que los resultados sean comparables entre accesiones y replicables en otros estudios. Esta verificación se realizó midiendo un objeto de tamaño conocido y confirmando las dimensiones en el programa (De Medeiros *et al.*, 2020).

7.5.2.1.5. Exportación y control de calidad de datos

Finalmente, se generó una tabla en formato CSV con las métricas por objeto, acompañadas de máscaras y *overlays* que permitieron auditar la segmentación realizada; la revisión de los datos se realizó con la finalidad de detectar valores atípicos, granos fusionados o inconsistencias entre imágenes. Posterior a la depuración, los resultados se resumieron por accesión, se calculó la desviación estándar y los promedios de cada variable (De Medeiros *et al.*, 2020).

Informe final de Proyecto de Investigación

7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis.

Tabla 2

Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Analizar por medios digitales, características morfológicas de la semilla de Maíz (<i>Zea mays</i> L.).	<ul style="list-style-type: none"> • Área. • Perímetro. • Textura. • Colorimetría. • Longitud. • Ancho. • Grosor. • Circularidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Software de análisis de imágenes de alta calidad. • Computadora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Centímetro. • Milímetro.
Evaluar el fenotipo de 25 materiales preseleccionados de maíz en condiciones de agricultura de secano en San José, La Máquina, Suchitepéquez.	<ul style="list-style-type: none"> • Ancho de hoja (AH) • Largo de hojas (NTH) • No. De nudos (NN) • Altura de planta (AP) • Altura de mazorca (AM) • Diámetro de tallo (\emptysetT) 	<ul style="list-style-type: none"> • Estadal. • Cinta métrica. • Balanza. • Libros de campo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Centímetros. • Milímetros. • Gramos.



Informe final de Proyecto de Investigación

	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de parte ramificada (LPM) • Longitud de panícula (LP) • Diámetro de mazorca ($\emptyset M$) • No. De hileras (NH) • No. Granos (NG) • Diámetro de olote ($\emptyset O$) • Longitud de mazorca (LM) • Peso de 1,000 granos (P1000G). 		
<p>Describir la relación de resultados obtenidos en fase de campo y fase de laboratorio respecto a rendimiento en condiciones de sequía.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Varianza acumulada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Software R. • Análisis de Componentes principales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes principales.

Nota. El cuadro establece una relación directa entre los objetivos y los resultados obtenidos, mediante el mecanismo utilizado.



Informe final de Proyecto de Investigación

7.7. Procesamiento y análisis de la información.

El análisis de datos fue ejecutado bajo el enfoque cuantitativo, mediante técnicas estadísticas multivariantes, enfocadas en la reducción de la dimensionalidad y a la identificación de patrones que indiquen variabilidad entre las 25 accesiones de maíz nativo estudiadas. Se seleccionó el método de Análisis de Componentes Principales (PCA), mismo que permitió transformar un número amplio de variables en un número reducido de componentes con independencia estadística; preservando la mayor porción, posible, de la varianza original. Esto se justifica por la naturaleza de carácter exploratorio de la investigación y por la necesidad de sintetizar los descriptores morfológicos de interés, facilitando la identificación de, posibles, rasgos asociados a la tolerancia genética a sequía y a la seguridad alimentaria, y la comparación entre las accesiones estudiadas.

En base a lo anterior, los procedimientos estadísticos se establecieron en verificar los supuestos básicos para la aplicación del PCA (linealidad entre variables, adecuación de la matriz de correlaciones y la ausencia de multicolinealidad extrema. Para ello se calculó el índice de kaiser-mayer-olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett, confirmando la pertinencia del análisis. La interpretación se realizó considerando los autovalores superiores a 1, y los porcentajes acumulados de la varianza explicada, permitiendo seleccionar los componentes con mayor representabilidad.

En el contexto interpretativo, se trabajó bajo un nivel de confianza del 95% para las estimaciones, aplicando un nivel de significancia de 0.05 en las pruebas de hipótesis relacionadas a la validez de las matrices de correlaciones.

8. Aspectos éticos y legales

Esta investigación se realizó mediante técnicas y recursos que no necesitan establecer marcos legales ni permisos gubernamentales.



Informe final de Proyecto de Investigación

9. Resultados y discusión

9.1. Resultados de campo

En base a los datos obtenidos del análisis fenotípico a nivel de campo de las 25 accesiones estudiadas (23 accesiones criollas y 2 híbridos testigo), se tomaron un total de 15 variables (Ancho de hoja (AH), largo de hojas (NTH), No. De nudos (NN), altura de planta (AP), altura de mazorca (AM), diámetro de tallo ($\emptyset T$), longitud de parte ramificada (LPM), Longitud de panícula (LP), Diámetro de mazorca ($\emptyset M$), No. De hileras (NH), No. Granos (NG), Diámetro de olote ($\emptyset O$), Longitud de mazorca (LM) y Peso de 1,000 granos (P1000G)). A continuación, se presenta la tabla donde se disponen las características antes mencionadas en relación a las 25 accesiones estudiadas.

Tabla 3

Tabla resumen de características fenológicas de 25 accesiones

Accesión	NTH	AH	LH	NN	AP	AM	$\emptyset T$	LPM	LP	$\emptyset M$	NH	NG	DO	LM	P1000G
1	10.73	6.88	81.07	10.95	200.28	122.65	4.39	17.15	43.22	1.98	7.89	14.47	0.69	14.33	274.33
2	12.80	9.00	88.98	12.37	207.12	120.37	5.67	15.18	44.60	2.46	7.87	17.10	0.85	8.73	300.47
3	10.88	7.89	77.60	12.30	204.58	118.43	5.29	10.53	28.80	2.23	7.43	17.40	0.88	8.67	309.00
4	13.37	8.84	86.29	13.82	207.80	120.04	5.30	11.65	32.18	1.81	5.43	14.37	0.58	6.68	310.33
5	13.33	8.61	88.64	13.08	192.49	90.58	5.56	17.17	48.45	2.24	8.37	19.93	0.77	9.04	277.50
6	8.85	6.67	69.83	8.60	162.52	97.07	4.08	12.05	35.27	2.19	7.39	22.04	0.80	9.93	269.00
7	12.92	8.22	85.22	11.40	205.38	120.97	6.11	11.73	29.15	2.08	7.98	22.61	0.70	10.13	228.67
8	12.25	7.94	80.44	10.58	182.82	113.47	4.68	13.78	39.72	2.49	10.26	29.20	0.98	11.37	226.67
9	13.10	7.90	80.25	11.48	193.51	109.42	4.56	15.47	42.70	2.26	7.57	18.68	0.72	8.50	333.67
10	10.08	7.53	80.38	11.02	178.05	104.62	4.45	13.37	39.57	2.13	8.28	22.67	0.81	10.80	236.00
11	10.70	6.99	78.70	11.14	195.08	123.61	4.21	12.00	34.60	1.77	6.28	17.47	0.68	8.14	288.67
12	11.62	7.36	80.22	11.78	198.36	113.98	4.59	12.62	33.20	2.26	8.22	22.36	0.75	10.24	241.00
13	9.03	6.20	68.03	9.08	159.05	83.68	3.66	14.37	38.97	1.78	6.85	21.55	0.71	9.28	234.67
14	12.32	7.56	77.95	10.07	199.02	117.02	5.07	12.50	37.43	1.82	6.47	16.23	0.80	8.18	306.67
15	11.42	7.65	81.68	12.30	194.64	112.33	5.30	18.08	48.10	2.17	7.71	22.66	0.74	9.72	237.67
16	9.93	5.78	67.72	9.87	162.58	97.96	3.75	18.33	51.00	1.75	6.47	18.28	0.53	7.81	250.67
17	12.68	7.29	82.23	12.28	212.73	130.98	4.75	15.52	43.65	2.43	7.77	19.53	0.87	8.36	271.33
18	13.35	8.72	90.90	13.55	249.73	164.95	5.33	16.80	48.62	2.53	8.95	22.55	0.86	11.29	292.67
19	10.58	5.62	69.94	9.08	136.54	70.33	3.17	7.73	21.72	1.88	7.58	13.12	0.85	7.59	254.50
20	11.43	7.06	81.37	9.48	162.09	78.86	4.50	19.65	48.17	2.01	6.93	17.69	0.95	8.96	278.00
21	12.07	8.54	88.79	12.53	220.07	140.10	5.57	20.02	49.93	2.20	6.60	15.82	0.62	8.30	321.33
22	11.28	6.90	74.24	11.33	174.89	103.80	4.37	13.23	38.02	2.45	9.12	23.95	0.66	10.19	239.00
23	11.60	7.06	87.16	12.37	204.39	117.98	5.27	19.27	53.58	2.53	9.32	18.82	0.99	9.47	278.00
24	13.97	8.21	87.23	9.82	197.58	127.58	5.50	10.22	31.00	3.47	13.57	24.51	1.16	12.45	296.33
25	13.67	9.45	90.85	12.55	213.47	126.50	6.04	16.58	47.32	3.34	11.35	25.39	816.41	11.89	290.00

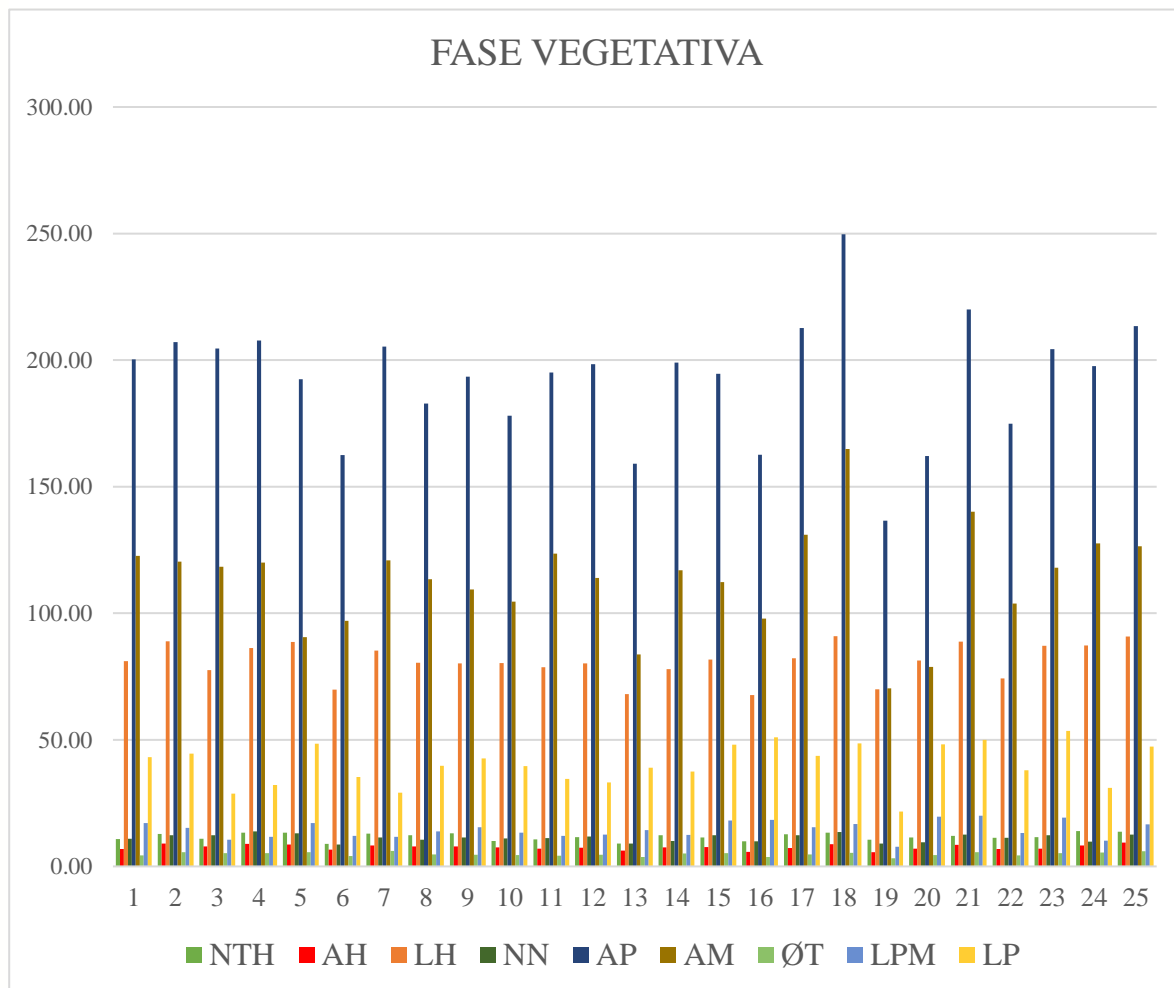
Nota. Se presentan las características fenológicas promedio de la totalidad de las plantas evaluadas en el ensayo de campo.

Informe final de Proyecto de Investigación

En base a las variables seleccionadas se separaron según la fase fenológica del cultivo, dividiendo la fase vegetativa de la fase de cosecha.

Figura 2

Gráfico comparativo de accesiones en fase vegetativa



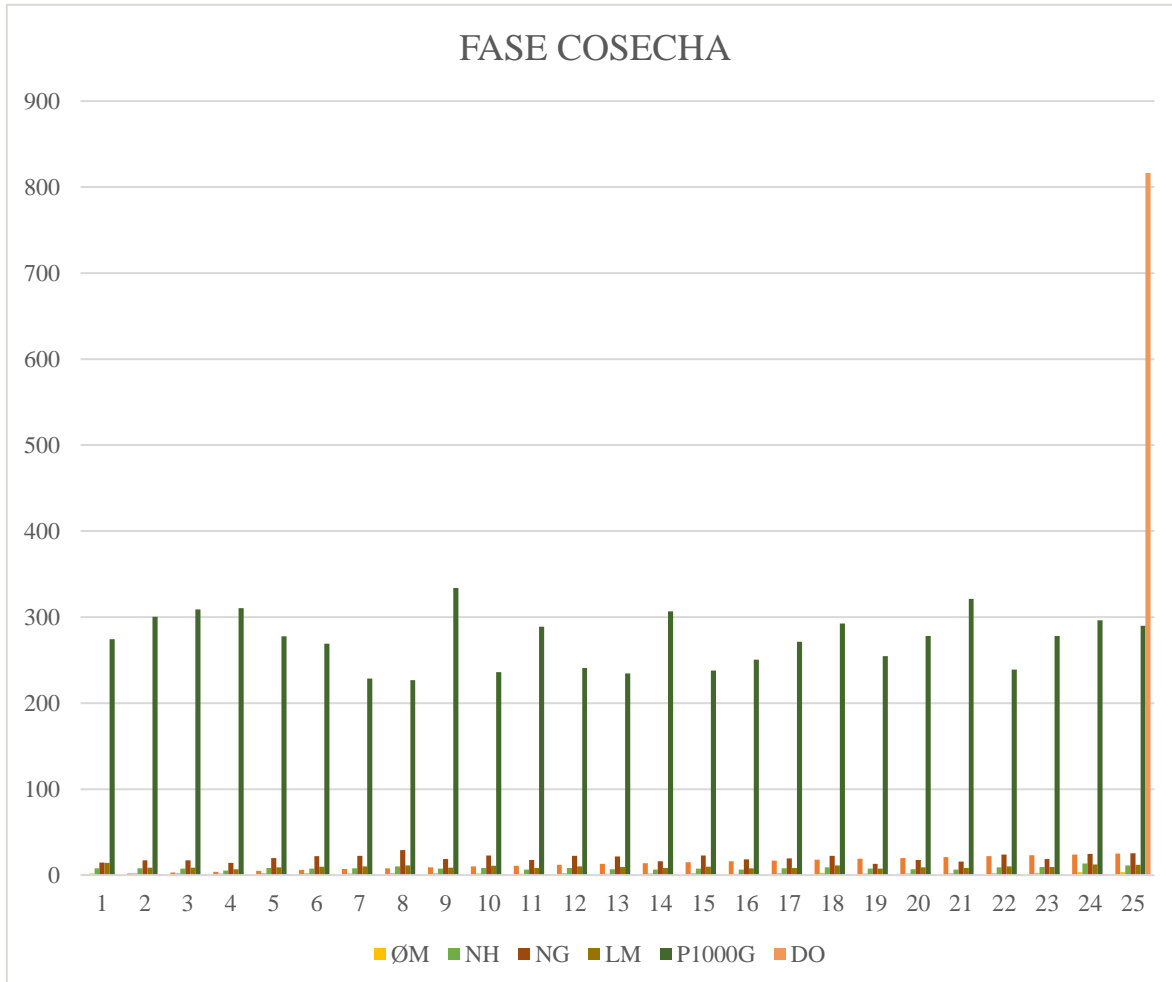
Nota. Únicamente se tomaron de referencia los promedios obtenidos de las variables fenotípicas de cada accesoión evaluada.

En la figura 2 se observa un comportamiento parecido dentro de las 25 accesiones para la fase vegetativa; sin embargo, la accesoión 18 presenta valores arriba del resto de las accesiones, incluyendo a los híbridos testigo, seguidamente se encuentra la accesoión 21, 23, 25 y 17.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 3

Grafico comparativo de accesiones en fase cosecha



Nota. Únicamente se tomaron de referencia los promedios obtenidos de las variables en la fase reproductiva y de cosecha, de cada accesión evaluada.

En la figura 3 se observa una clara diferencia entre las accesiones y la 25, en relación del diámetro del olote. Sin embargo, en peso de 1,000 granos sobresalen las accesiones 9 y 21.

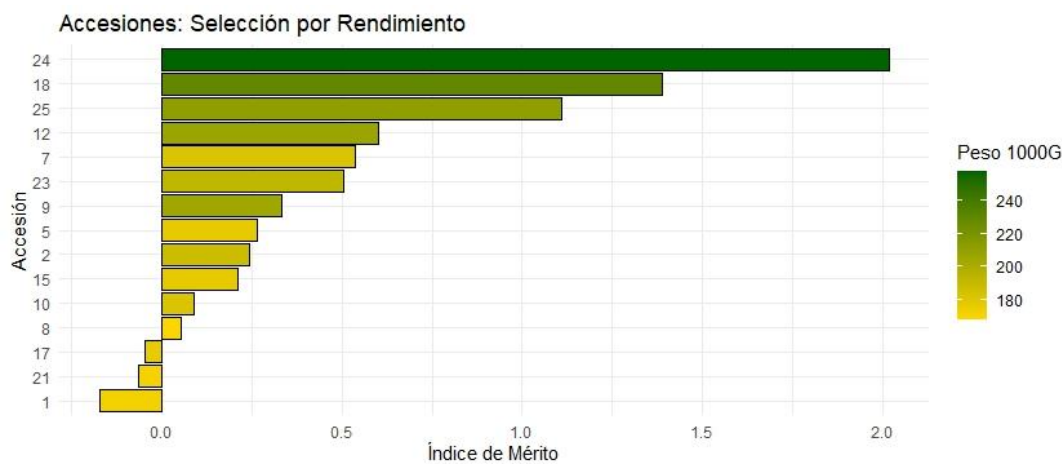
Durante las mediciones que fueron realizadas en campo, se observó que algunas variables de estudio se destacaban por su precisión en determinar las diferencias genéticas entre accesiones; además, las variables fenotípicas se encontraron correlacionadas entre sí.

Informe final de Proyecto de Investigación

Bajo este criterio solo se utilizaron tres variables vegetativas y cuatro variables de cosecha; debido a su combinación de múltiples características se utilizó un índice de selección por mérito, bajo la siguiente ponderación; peso de 1,000 granos (40%), componentes de mazorca (30%), supervivencia (20%) y vigor vegetativo (10%).

Figura 4

Gráfica comparativa entre accesiones por rendimiento



Nota. La figura establece una gráfica de calor, entre las accesiones que presentaron mejor rendimiento.

De esta manera, en la figura 4 se observan trece accesiones que pueden tener características similares a los dos testigos, obteniendo datos fenológicos y de rendimientos por arriba del promedio, como lo es las accesiones 18, 12, 7, 23, 9, 5, 2, 15, 10 y 8.

9.2. Resultados de laboratorio

Los resultados obtenidos del análisis morfológico digital de grano, se engloban dentro de 14 variables (Área (A), Perímetro (P), Coordenada X de la caja delimitadora (BX), Coordenada Y de la caja delimitadora (BY), Ancho (W), Altura (H), Eje mayor (Ma), Eje menor, (Mi), Circularidad (C), Diámetro de Feret (F), Diámetro Mínimo de Feret (MF), Relación de aspecto (AR), Redondez (R) y Solidez (S)) distribuidas dentro de 25 accesiones de maíz.

A continuación, se presenta la tabla 4 que contiene el resumen de las características antes mencionadas en relación a las 25 accesiones estudiadas.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 4

Tabla resumen de análisis morfológico digital de 25 accesiones

Accesión	A	P	BX	BY	W	H	Ma	Mi	C	F	MF	AR	R	S
1	82.32	43.05	19.98	16.57	12.89	8.72	12.74	8.21	0.58	13.19	8.36	1.56	0.65	0.97
2	98.35	49.55	22.72	16.40	10.58	12.48	12.36	10.15	0.55	13.04	10.11	1.23	0.83	0.98
3	99.44	44.84	20.92	17.02	10.74	12.15	12.82	9.85	0.64	13.22	9.83	1.32	0.77	0.98
4	68.47	34.92	21.16	15.36	9.29	9.87	9.91	8.71	0.72	10.31	8.79	1.14	0.88	0.98
5	76.63	43.12	21.07	17.27	9.19	11.24	11.48	8.49	0.56	11.85	8.55	1.36	0.75	0.98
6	69.65	39.28	24.48	17.17	8.84	10.57	10.32	8.56	0.58	10.76	8.64	1.21	0.84	0.97
7	65.27	37.88	23.75	17.75	8.37	10.46	10.10	8.20	0.60	10.54	8.33	1.23	0.81	0.98
8	66.45	39.48	25.12	16.57	8.44	10.79	10.93	7.73	0.57	11.35	7.89	1.42	0.71	0.97
9	83.49	39.90	21.03	17.44	10.02	10.84	10.91	9.69	0.67	11.31	9.67	1.13	0.89	0.98
10	54.77	32.83	20.83	16.95	8.05	9.18	9.09	7.66	0.66	9.40	7.83	1.19	0.84	0.99
11	86.65	42.35	21.57	15.60	9.28	12.18	12.17	9.03	0.63	12.44	9.06	1.36	0.74	0.99
12	66.23	38.04	20.97	17.35	8.84	10.10	9.82	8.57	0.63	10.27	8.68	1.15	0.88	0.98
13	58.91	34.18	21.39	20.18	7.92	9.87	9.67	7.75	0.66	9.98	7.80	1.26	0.81	0.98
14	86.99	43.76	21.41	18.75	9.75	11.81	12.12	9.11	0.60	12.52	9.14	1.34	0.75	0.98
15	79.26	42.70	21.31	17.68	9.36	11.84	12.04	8.37	0.59	12.64	8.57	1.45	0.70	0.98
16	79.63	44.43	20.82	17.43	9.80	11.35	12.16	8.32	0.56	12.61	8.52	1.47	0.68	0.98
17	72.39	42.70	22.54	20.14	9.14	10.87	10.71	8.58	0.52	11.23	8.76	1.25	0.81	0.96
18	80.42	45.31	18.97	15.30	9.95	10.92	11.50	8.90	0.57	11.96	8.96	1.30	0.78	0.97
19	67.68	38.23	21.60	17.82	9.03	9.97	10.00	8.61	0.61	10.29	8.68	1.17	0.86	0.98
20	81.51	41.94	20.84	17.45	9.90	10.90	10.92	9.51	0.61	11.29	9.53	1.16	0.88	0.98
21	95.96	46.68	20.36	18.32	11.11	11.55	12.07	10.09	0.59	12.79	10.06	1.20	0.84	0.98
22	78.85	39.12	20.31	17.68	9.65	10.94	11.65	8.59	0.66	11.93	8.67	1.36	0.74	0.98
23	76.08	42.25	19.11	17.70	9.74	10.51	10.76	9.01	0.57	11.13	9.07	1.20	0.84	0.98
24	71.84	38.09	17.60	19.43	9.89	9.77	10.49	8.72	0.65	10.84	8.77	1.21	0.84	0.98
25	72.61	35.79	18.18	24.05	8.70	10.81	11.17	8.27	0.71	11.30	8.21	1.35	0.74	0.99

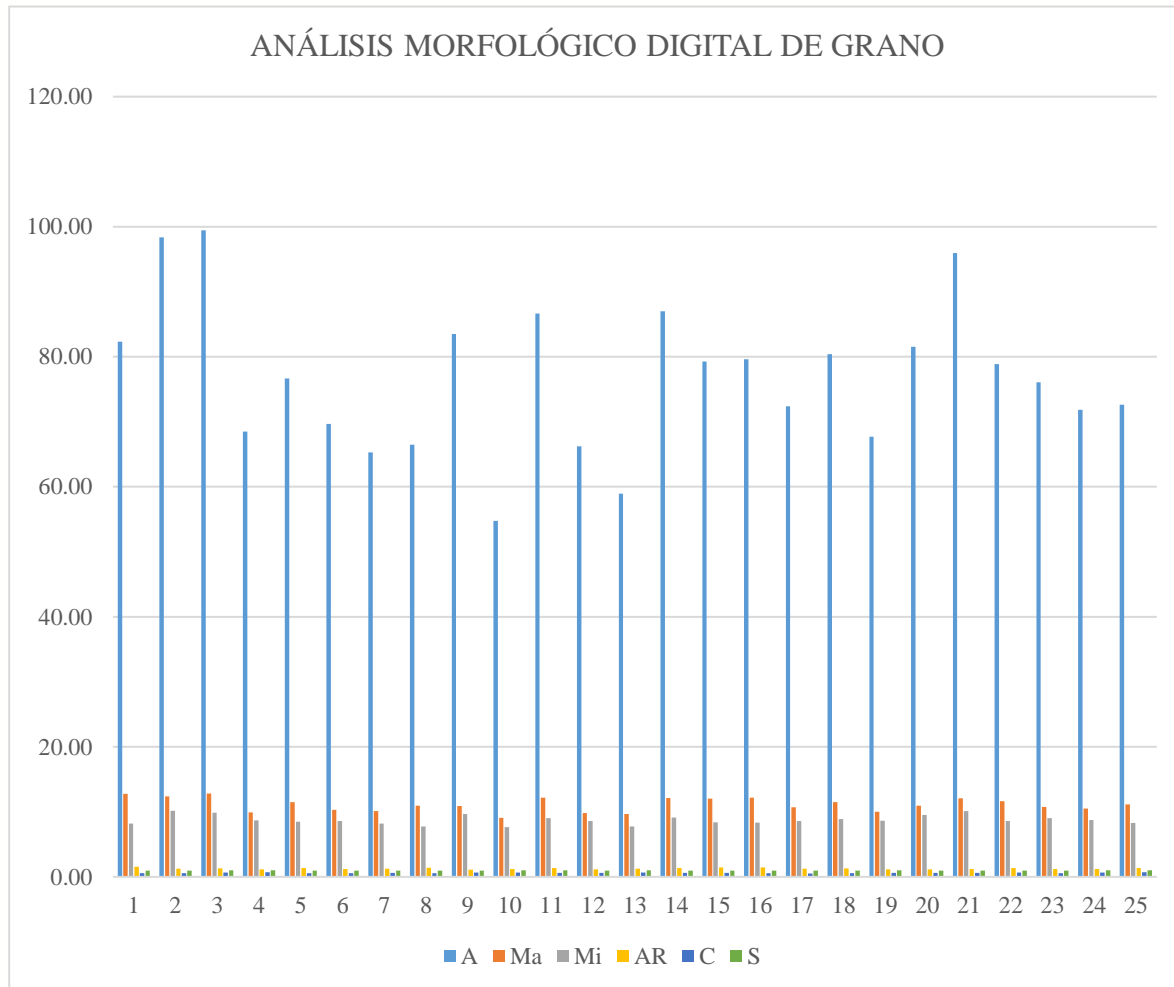
Nota. Se presenta las características morfológicas de los granos promedio de la totalidad de granos de las accesiones evaluadas.

Debido a la amplia cantidad de variables, se optó por establecer un conjunto reducido de las mismas que responden a la necesidad de destacar aquellos indicadores que aportan mayor poder discriminante entre las accesiones evaluadas. Bajo este parámetro se estableció que las variables de grano siguientes: área, eje mayor y menor, relación de aspecto, circularidad y solidez; se encuentran relacionadas al tamaño, la forma y la compacidad del grano, permitiendo describir de manera integral la variabilidad fenotípica estudiada.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 5

Gráfico comparativo de variables morfológicas de grano



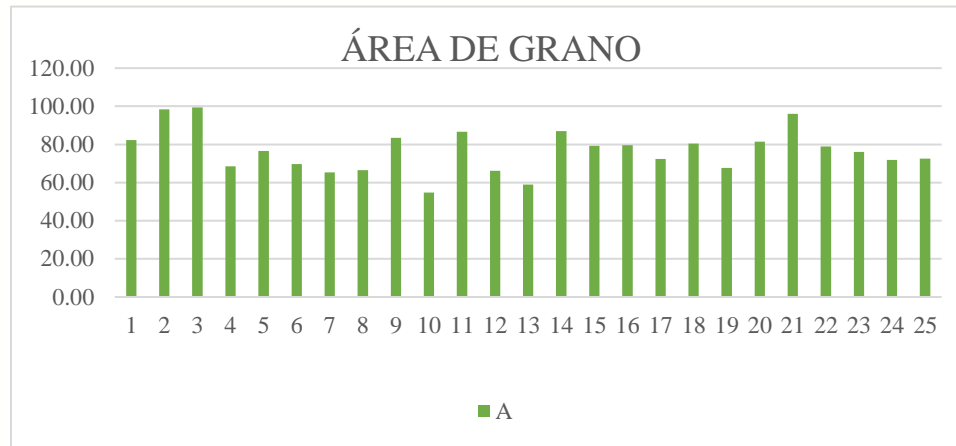
Nota. Únicamente se tomaron de referencia los promedios obtenidos de las variables de grano de cada accesión evaluada.

La figura 5 muestra la amplia diversidad presentada dentro de la población total estudiada, estas variables sintetizan la información más relevante, confirmación entre parámetros con alta correlación y diferenciando las accesiones evaluadas. Dentro de la preselección realizada, las variables que presentan mayor peso, dentro del contexto de la tolerancia genética a sequía y la seguridad alimentaria, son el área y la relación de aspecto del grano.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 6

Gráfico comparativo de área de grano

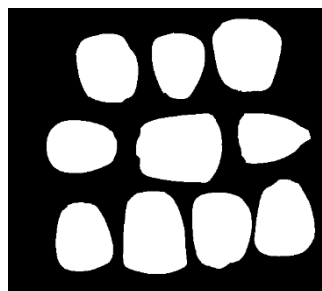


Nota. La gráfica establece las diferencias entre el promedio del área de los granos de las accesiones evaluadas.

Respecto al área del grano, como se observa en la figura 6, las accesiones 2, 3 y 21 poseen valores más altos en relación al resto de accesiones estudiadas. La magnitud del área de grano establece un indicador morfológico relevante, dentro del contexto de tolerancia genética a sequía, debido a que un grano de mayor tamaño, suele reflejar, una mayor capacidad de acumulación de reservas energéticas y nutrientes, asegurando la viabilidad de la semilla y la eficiencia del llenado en circunstancias de estrés hídrico; además, está asociado a la resiliencia fisiológica de la planta y al incremento del rendimiento agrícola, aspecto crítico en contextos de inseguridad alimentaria (Bi *et al.*, 2025). En la figura 7 se muestra el área delimitada de grano de la accesión 03.

Figura 7

Área limitada de granos de accesión 03

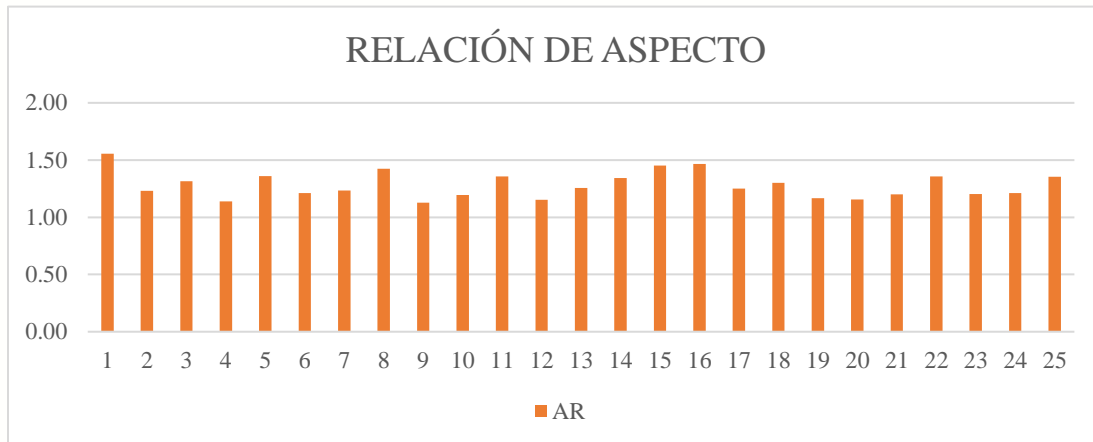


Nota. El área se delimitó mediante el análisis de fotografías de alta calidad mediante el software *Ilastik*.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 8

Gráfico comparativo de relación de aspecto de grano



Nota. La gráfica establece las diferencias entre el promedio de la relación de aspecto de los granos de las accesiones evaluadas.

Para la variable de relación de aspecto del grano, como se observa en la figura 8, las accesiones 3, 8, 11, 19, 18, 20, 21, 23 y 24; presentan valores inferiores al resto estudiado. Este factor es fundamental dentro de un descriptor morfológico de grano, pues expresa la proporción que existe entre el eje mayor y el menor del grano; este sintetiza la información sobre la elongación y forma del grano; dentro del contexto de la tolerancia genética a sequía, los valores altos de AR reflejan, posibles, fallas en el llenado del grano, debido a la tendencia a quedar más estrecho y menos voluminoso (Tu *et al.*, 2022). En la figura 9 se observa la relación de aspecto de los granos de la accesión 03.

Figura 9

Relación de aspecto de grano de accesión 03



Nota. La relación de aspecto se estableció con el análisis de fotografías de alta calidad mediante el software *Ilastik*.

Informe final de Proyecto de Investigación

9.2.1. Fotografías de grano de 25 accesiones evaluadas

Figura 10

Granos de accesiones de 1 a 12



Nota. Accesiones 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D), 5 (E), 6 (F), 7 (G), 8 (H), 9 (I), 10 (J), 11 (K) y 12 (L).

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 11

Granos de accesiones de 13 a 23



Nota. Accesiones 13 (M), 14 (N), 15 (Ñ), 16 (O), 17 (P), 18 (Q), 19 (R), 20 (S), 21 (T), 22 (U), y 23 (V).

Informe final de Proyecto de Investigación

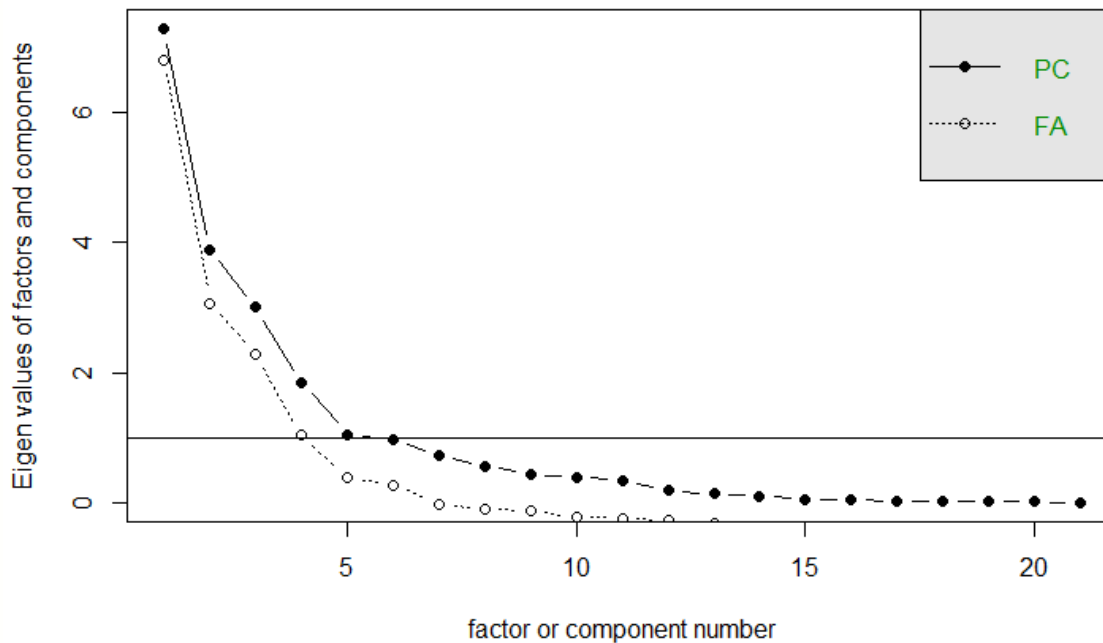
En las figuras 10 y 11, se muestran las imágenes de los granos de las 23 accesiones estudiadas, que respaldan los datos y discusión ya mencionados anteriormente.

9.3. Resultados asociados

A partir de los resultados obtenidos, se estableció un criterio de trabajo relacionado a el correcto análisis estadístico de los datos en base al diseño experimental Alfa lattice. A raíz del, gran, número de variables tomadas, se realizó un análisis mediante el gráfico de sedimentación de datos, mismo que permitió seleccionar las variables que explican la mayor cantidad de varianza de la población total.

Figura 12

Gráfico de sedimentación de datos



Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.



Informe final de Proyecto de Investigación

Tabla 5

Tabla de Análisis de Componentes Principales

Variable	RC1	RC3	RC2	RC4	RC5
#TH	0.84	0.17	-0.2	0.07	0.05
AH	0.94	0.06	-0.07	-0.04	0.14
LH	0.88	0.27	-0.06	0.06	0.23
#N_	0.82	-0.03	0.12	0.15	0.07
AP	0.87	0.18	0.15	0.22	0.06
AM	0.74	0.27	0.15	0.22	-0.04
DT	0.91	0.05	0.08	-0.04	0.05
LPR	0.15	0.15	0.13	0.2	0.93
LP	0.26	0.21	0.1	0.25	0.87
DM	0.35	0.86	-0.06	0.14	0.14
#Hs	0.12	0.95	-0.02	0.04	0.1
#Gs	0.3	0.59	-0.07	-0.52	-0.29
DO	0.27	0.84	-0.02	-0.06	0.08
LM	-0.15	0.67	0.34	-0.03	0.3
P100G	0.3	-0.04	-0.19	0.78	0.31
ASG	0.25	-0.12	0.56	0.7	0.02
PO	0.17	-0.05	0.77	0.57	0.09
AG	0.05	0.16	0.3	0.78	0.18
LG	0.3	-0.29	0.65	0.22	-0.12
CIR	0.12	-0.06	-0.74	-0.14	-0.07
RD	0.07	-0.22	-0.75	0.21	-0.18

Nota. En este análisis se establecieron las variables con más significancia para cada uno de los componentes establecidos; esto mediante la identificación del porcentaje de significancia demostrado.



Informe final de Proyecto de Investigación

La figura 12 muestra todas las variables tomadas en campo y laboratorio, y el criterio de selección de Kaiser para Análisis de Componentes Principales (PCA), en donde muestra el número total de componentes a evaluar (5) y el número de factores a evaluar (4), respetando que hay mayor cantidad de variables que de accesiones (Tarazona *et al.*, 2020).

Posteriormente, se realizó la separación de las variables dentro de cada uno de los Componentes Principales, como se observa en la tabla 5, de acuerdo a el porcentaje de significancia de cada uno dentro de los compontes. Esto con la finalidad de discriminar las variables y generar grupos que posean más varianza proporcional.

Tabla 6

Tabla resumen de Análisis de Componentes Principales

	RC1	RC3	RC2	RC4	RC5
Cargas de sumas de cuadrados	5.88	3.59	2.82	2.68	2.1
Proporción de varianza	0.28	0.17	0.13	0.13	0.1
Varianza acumulada	0.28	0.45	0.59	0.71	0.81
Proporción explicada	0.34	0.21	0.17	0.16	0.12
Proporción acumulada	0.34	0.55	0.72	0.88	1

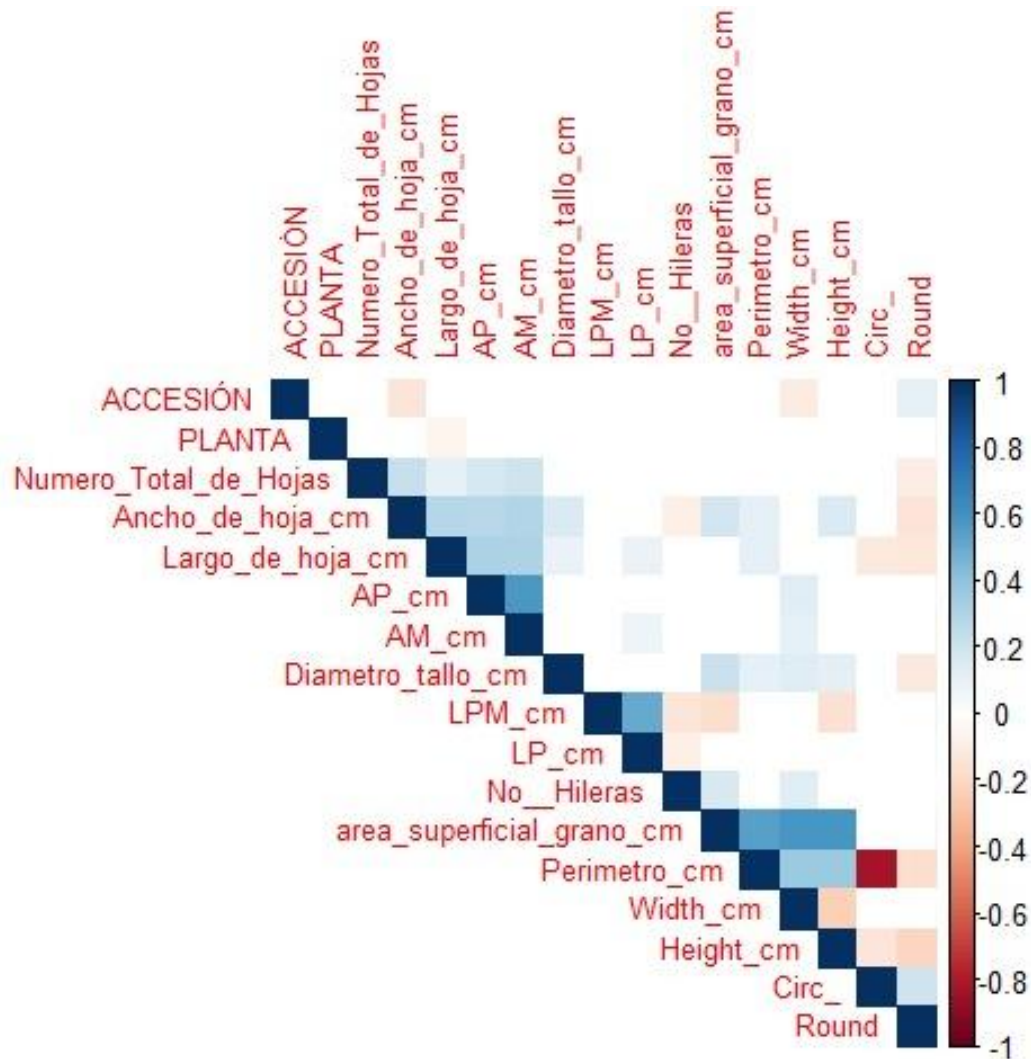
Nota. En el cuadro se presenta la proporción de varianza que presenta cada uno de los componentes; siendo la suma de estos la varianza acumulada.

Informe final de Proyecto de Investigación

En base a la gráfica de sedimentación de datos y a la tabla 6, se confirman cinco componentes principales explicando el 81% de la varianza total de la población (Gangadhara *et al.*, 2023). Se identifican que el componente 1 y el componente 3 representan el 45% de la varianza acumulada; el componente 2 y 4 explican el 30%; y el componente 1 y 5 explican el 41%; siendo todos los anteriores, los que explican los mayores porcentajes, dentro de la varianza acumulada.

Figura 13

Mapa de calor de variables agronómicas y de grano del ensayo realizado

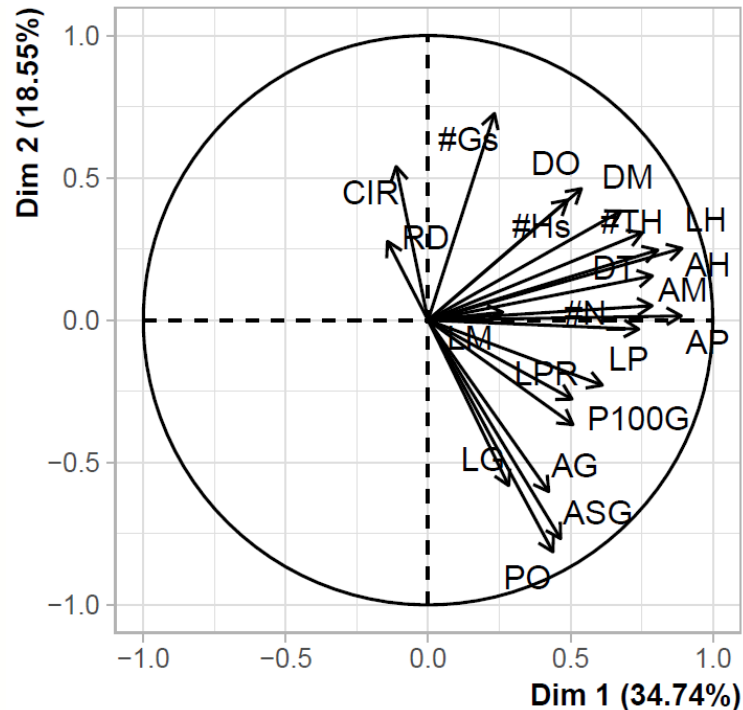


Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 14

Gráfico de variables con mayor significancia según PCA



Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.

La selección de las variables dentro de los componentes principales se confirma con la matriz de correlación de la figura 13 y 14. Siendo las de mayor peso: No. Total de Hojas, Ancho de hoja, largo de hoja, diámetro de mazorca, diámetro de olote, peso de 1,000 granos, área superficial, perímetro, ancho, largo del grano; índice de asincronía floral (ASI) y el tamaño de panícula.

Posteriormente, se realizó la correlación de las variables estudiadas, mediante la matriz establecida a partir del coeficiente de similitud de Jaccard, con la finalidad de observar la interacción entre las variables y establecer grupos con correlación y significancia estadística. A continuación, en Figura 15, se presenta dicho análisis.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 15

Gráfica de correlación de variables mediante coeficiente de Jaccard

	#TH	AH	LH	#N ₁	AP	AM	DT	LPR	LP	DM	#Hs	#Gs	DO	LM	PI00G	ASG	PO	AG	LG	CIR	RD
#TH	1.00	0.84	0.81	0.61	0.66	0.52	0.76	0.18	0.27	0.46	0.29	0.30	0.42	-0.11	0.39	0.13	0.06	0.06	0.12	0.16	0.17
AH	0.84	1.00	0.88	0.71	0.78	0.64	0.89	0.23	0.33	0.37	0.16	0.27	0.36	0.01	0.32	0.19	0.09	0.04	0.20	0.19	0.07
LH	0.81	0.88	1.00	0.74	0.81	0.66	0.85	0.37	0.46	0.58	0.38	0.30	0.50	0.12	0.34	0.19	0.17	0.17	0.09	0.03	0.09
#N ₁	0.61	0.71	0.74	1.00	0.80	0.63	0.68	0.18	0.27	0.30	0.11	0.03	0.12	-0.05	0.36	0.32	0.29	0.22	0.26	-0.01	-0.08
AP	0.66	0.78	0.81	0.80	1.00	0.94	0.77	0.27	0.38	0.44	0.26	0.24	0.30	0.09	0.44	0.38	0.35	0.33	0.23	-0.06	-0.09
AM	0.52	0.64	0.66	0.63	0.94	1.00	0.61	0.18	0.30	0.43	0.30	0.31	0.31	0.15	0.38	0.31	0.30	0.31	0.17	-0.05	-0.13
DT	0.76	0.89	0.85	0.68	0.77	0.61	1.00	0.18	0.27	0.37	0.17	0.26	0.28	-0.02	0.19	0.28	0.20	0.11	0.29	0.06	0.00
LPR	0.18	0.23	0.37	0.18	0.27	0.18	0.18	1.00	0.98	0.36	0.27	-0.18	0.24	0.32	0.45	0.28	0.33	0.36	0.08	-0.19	-0.19
LP	0.27	0.33	0.46	0.27	0.38	0.30	0.27	0.98	1.00	0.45	0.33	-0.10	0.31	0.30	0.50	0.33	0.33	0.41	0.09	-0.12	-0.19
DM	0.46	0.37	0.58	0.30	0.44	0.43	0.37	0.36	0.45	1.00	0.93	0.51	0.81	0.45	0.23	0.08	0.07	0.20	-0.07	0.01	-0.07
#Hs	0.29	0.16	0.38	0.11	0.26	0.30	0.17	0.27	0.33	0.93	1.00	0.53	0.78	0.59	0.05	-0.05	-0.02	0.18	-0.21	-0.02	-0.20
#Gs	0.30	0.27	0.30	0.03	0.24	0.31	0.26	-0.18	-0.10	0.51	0.53	1.00	0.56	0.12	-0.40	-0.35	-0.34	-0.35	-0.15	0.18	-0.10
DO	0.42	0.36	0.50	0.12	0.30	0.31	0.28	0.24	0.31	0.81	0.78	0.56	1.00	0.50	0.07	-0.07	0.00	0.02	-0.08	-0.06	-0.08
LM	-0.11	0.01	0.12	-0.05	0.09	0.15	-0.02	0.32	0.30	0.45	0.59	0.12	0.50	1.00	-0.04	0.02	0.18	0.26	-0.13	-0.27	-0.47
PI00G	0.39	0.32	0.34	0.36	0.44	0.38	0.19	0.45	0.50	0.23	0.05	-0.40	0.07	-0.04	1.00	0.48	0.37	0.51	0.16	0.00	0.24
ASG	0.13	0.19	0.19	0.32	0.38	0.31	0.28	0.28	0.33	0.08	-0.05	-0.35	-0.07	0.02	0.48	1.00	0.86	0.74	0.74	-0.31	-0.24
PO	0.06	0.09	0.17	0.29	0.35	0.30	0.20	0.33	0.33	0.07	-0.02	-0.34	0.00	0.18	0.37	0.86	1.00	0.65	0.71	-0.73	-0.35
AG	0.06	0.04	0.17	0.22	0.33	0.31	0.11	0.36	0.41	0.20	0.18	-0.35	0.02	0.26	0.51	0.74	0.65	1.00	0.12	-0.25	-0.26
LG	0.12	0.20	0.09	0.26	0.23	0.17	0.29	0.08	0.09	-0.07	-0.21	-0.15	-0.08	-0.13	0.16	0.74	0.71	0.12	1.00	-0.35	-0.23
CIR	0.16	0.19	0.03	-0.01	-0.06	-0.05	0.06	-0.19	-0.12	0.01	-0.02	0.18	-0.06	-0.27	0.00	-0.31	-0.73	-0.25	-0.35	1.00	0.35
RD	0.17	0.07	0.09	-0.08	-0.09	-0.13	0.00	-0.19	-0.19	-0.07	-0.20	-0.10	-0.08	-0.47	0.24	-0.24	-0.35	-0.26	-0.23	0.35	1.00

Nota. Los datos se calcularon mediante el software estadístico R.

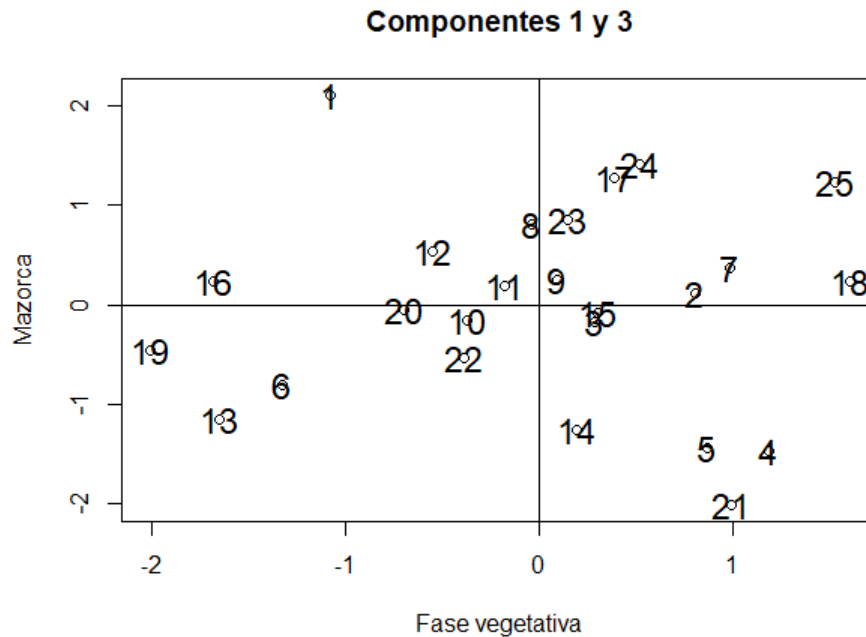
En base a la selección de las variables y al número de componentes principales, expuestos en el gráfico de sedimentación (Figura 12), se estableció la metodología de análisis de datos, mediante la comparación entre componentes, establecido por medio de la proporción de varianza acumulada, de los dos componentes, y su representabilidad en la varianza total del estudio realizado. Como lo establecido por Gabriel (1971), el análisis se realizó mediante gráficos multivariantes (BiPlot).

Las gráficas multivariantes constituyen una herramienta de análisis visual que deriva del análisis de PCA, permitiendo representar, de manera simultánea, la distribución de las accesiones y la contribución de las variables evaluadas dentro de un mismo plano (Gabriel, 1971).

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 16

Gráfico multivariante de componentes principales 1 y 3



Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.

En la figura 16, se presenta la gráfica multivariante (BiPlot) que representa al componente 1 y 3, engloba las variables representativas de fase vegetativa (No. Total de Hojas, Ancho de hoja y largo de hoja) y las variables de calidad de mazorca (diámetro de mazorca y diámetro de olote). En este gráfico se observa que las accesiones 24 y 25 (mismas que representan a los híbridos testigos) siendo con valores positivos en ambos componentes; seguidamente las accesiones 7, 17, 18 y 23 que presentan valores sobresalientes en comparación al resto estudiado, en base a los componentes anteriormente mencionados.

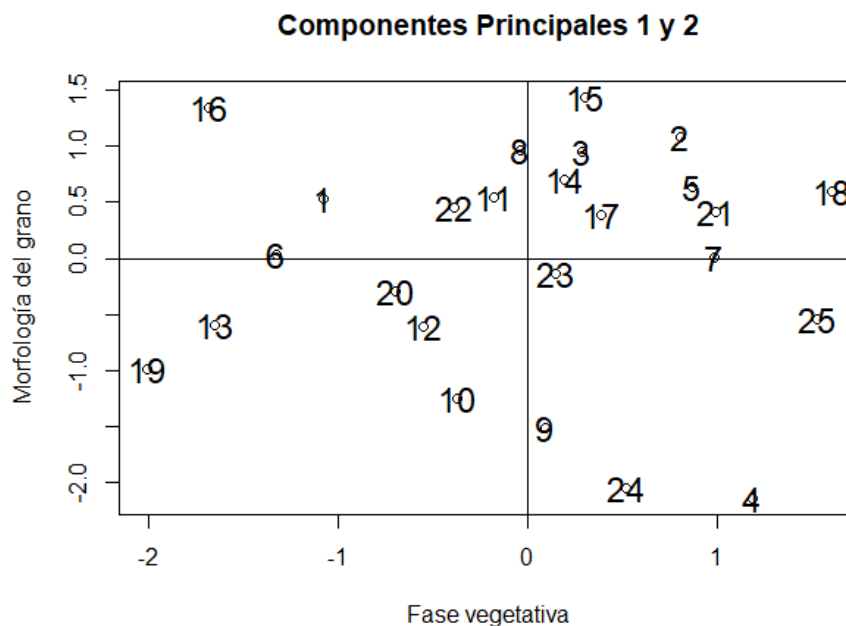
El componente 1, asociado a la Fase vegetativa del cultivo, posee el porcentaje de proporción de varianza más alto, teniendo una gran injerencia dentro del sistema; este componente refleja la capacidad de la planta para establecer una arquitectura vegetativa eficiente. Dentro del contexto de la tolerancia genética a sequía, estas variables son críticas, debido a que

Informe final de Proyecto de Investigación

determinan la superficie fotosintética y la eficiencia del uso de la radiación lumínica, además de la regulación de la transpiración (Delzon, 2015; Hallik *et al.*, 2009). Accesiones que poseen una mayor cantidad de hojas, con láminas foliares amplias, tienden a establecer un balance hídrico con alta estabilidad y, por ende, una mayor capacidad de producción de fotoasimilados, inclusive bajo condiciones de estrés hídrico (Hallik *et al.*, 2009). Por otro lado, el componente 3 que está vinculado a la calidad de la mazorca, conforma un indicador directo de la eficiencia reproductiva y del potencial de rendimiento, debido a que, mazorcas con mayor diámetro y olores más grandes, indican una capacidad mayor de llenado de grano y una estabilidad mayor a nivel estructural, características ligadas a garantizar la productividad en condiciones de estrés hídrico (Chen *et al.*, 2022). En el marco de la seguridad alimentaria, estas características poseen mayor importancia, debido a que aseguran una mayor calidad y cantidad de grano por unidad cultivada, siendo fundamentales para contribuir a la resiliencia de los sistemas agrícolas bajo condiciones de sequía (Chen *et al.*, 2022).

Figura 17

Gráfica multivariante de componentes principales 1 y 2



Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.

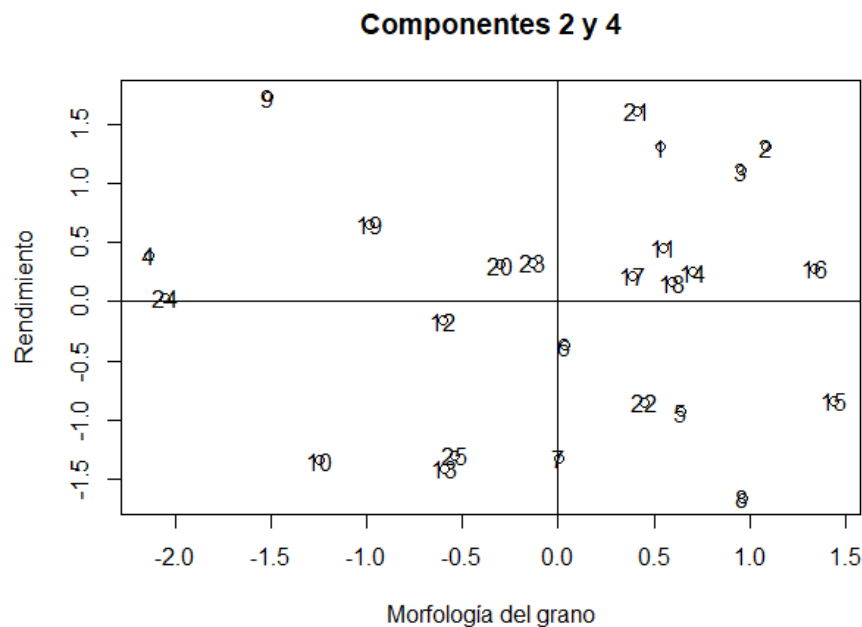
Informe final de Proyecto de Investigación

Posteriormente, en la figura 17 se muestra el *BiPlot* que representa al componente 1 y 2, estos presentan las variables de fase vegetativa (anteriormente expuesta) y la morfología del grano (perímetro de grano, ancho de grano y largo de grano). En este caso sobresalen las accesiones 2, 3, 5, 15, 17, 18 y 21; siendo las que presentan valores idóneos dentro de los componentes estudiados.

El componente 2 engloba las características de morfología del grano, este conjunto de variables permite evaluar, de forma precisa, la forma y el tamaño del grano, características directamente relacionadas con la eficiencia en el llenado y la acumulación de reservas (García-Lara *et al.*, 2018). Bajo condiciones de estrés hídrico, si la planta posee capacidad de mantener granos con perímetros amplios y dimensiones estables, constituyen un indicador directo de resiliencia fisiológica, lo que refleja una adecuada translocación de fotoasimilados a los órganos reproductores (García-Lara *et al.*, 2018).

Figura 18

Gráfica multivariante de componentes principales 2 y 4



Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.



Informe final de Proyecto de Investigación

Seguidamente, en la figura 18, donde se muestra la gráfica multivariante que representa al componente 2 y 4, presentan las variables de morfología del grano (anteriormente expuesta) y de rendimiento (peso de 1,000 granos y área superficial de grano). En este caso sobresalen las accesiones 1, 2, 3, 11, 14, 16, 17, 18 y 21; mismas que presentan valores idóneos dentro de los componentes analizados.

El componente 4 engloba lo relacionado con las características de rendimiento, estas métricas constituyen indicadores con importancia en la evaluación de la productividad de accesiones de maíz, debido a que reflejan la capacidad de acumulación de reservas y en la eficiencia en el llenado de grano. La característica de peso de mil granos (P1,000G) es un parámetro obligatorio dentro de estudios de rendimiento, debido a que sintetiza la densidad y volumen de los granos; por otro lado, el área superficial cumple como complemento al describir la extensión externa del grano (Kamara *et al.*, 2003). En la figura 19 se presentan las fotografías de los granos de las accesiones en mención.

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 19

Granos de accesiones sobresalientes en BiPlot de componentes 2 y 4

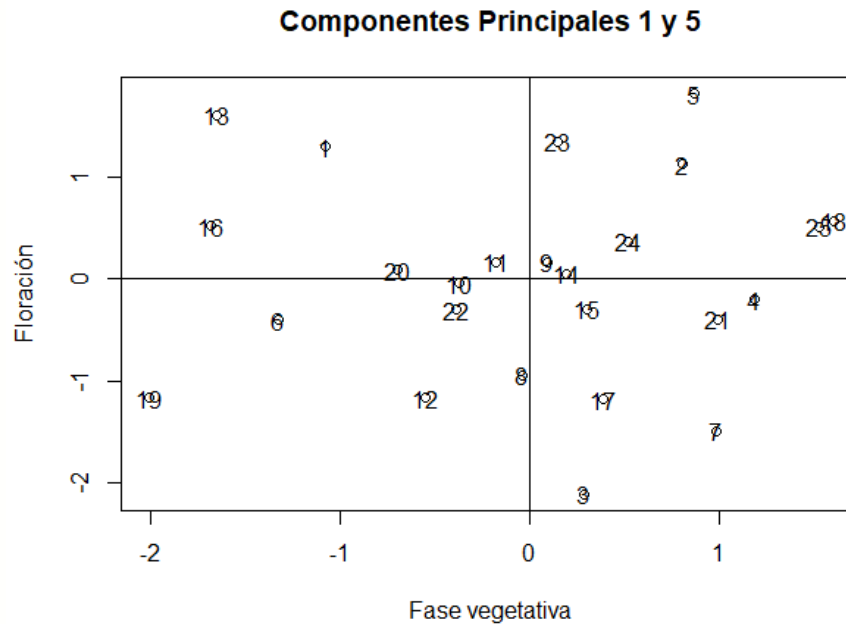


Nota. Accesiones 1 (A), 2 (B), 3 (C), 11 (D), 14 (E), 16 (F), 17 (G), 18 (H) y 21 (I).

Informe final de Proyecto de Investigación

Figura 20

Gráfica multivariante de componentes principales 1 y 5



Nota. El gráfico se realizó mediante el software estadístico R.

Finalmente, en la figura 20 donde la gráfica multivariante representa al componente 1 y 5, estos presentan las variables de fase vegetativa (anteriormente expuesta) y de floración (índice de asincronía floral (ASI) y el tamaño de panícula). En este caso las accesiones que presentan valores sobresalientes son las 2, 5, 9, 18, 23, 24 y 25; relacionado a los componentes evaluados.

El componente 5 engloba las características de la fase reproductiva, en las que entra el ASI, definido como la diferencia en días entre la aparición de los estigmas femeninos y la emisión de la panícula; mismo que es un factor crítico de la eficiencia reproductiva bajo condiciones de estrés hídrico; un valor reducido de ASI refleja una mayor sincronía de los órganos reproductores, esto incrementa el porcentaje de fecundación exitosa y, en consecuencia, el llenado completo de grano (Lima *et al.*, 2022). Por otro lado, el tamaño de la panícula aporta información sobre las características de producción de polen de la accesión, misma que está ligado a favorecer la fecundación, inclusive en condiciones adversas (Fonseca *et al.*, 2003).



Informe final de Proyecto de Investigación

De acuerdo a los resultados anteriores, puede considerarse que las accesiones 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 21 y 23; son las que muestran posible tolerancia a sequía, de acuerdo a las variables estudiadas.

10. Propiedad intelectual

Los resultados de la investigación no pueden estar sujetos a propiedad intelectual, siendo los materiales de maíz estudiados, parte del patrimonio mundial que Guatemala posee.

11. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 7

Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Datos fenotípicos y morfológicos digitales de grano, de las 25 accesiones de maíz nativas estudiadas.	Facultad de Agronomía (USAC)	2	Agricultores del corredor seco del país	2 millones de personas
	Estudiantes que realizaron su EPS o pasantía durante el proyecto	2		

Nota. Los beneficiarios indirectos se establecieron mediante un promedio de las personas del Corredor Seco.



Informe final de Proyecto de Investigación

12. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Tabla 8

Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

	Sí	No
Presentación TV		X
Entrevistas radiales		X
Podcast		X
Entrevista DIGI		X
Recursos audiovisuales		X
Congresos científicos nacionales o internacionales	X	
Talleres		X
Publicación de libro		X
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales		X
Presentación pública		X
Presentación autoridades USAC		X
Presentación a beneficiarios directos	X	
Entrega de resultados	X	
Docencia en grado	X	
Docencia postgrado		X
Póster científico		X
Trifoliales		X
Conferencias	X	
Otro (describa)		

Nota. La divulgación de resultados, también, se realizará de forma conjunta con los resultados obtenidos en la primera fase de esta línea de investigación.



Informe final de Proyecto de Investigación

13. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

El presente proceso investigativo fue enfocado para la contribución, significativa, al Plan Nacional de Desarrollo “K’atun Nuestra Guatemala 2032” mediante los resultados obtenidos; específicamente a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) de Seguridad alimentaria y nutricional; y Acceso y gestión de los recursos naturales. Esto se confirma gracias a que la investigación busca soluciones y alternativas para disminuir los daños que el cambio climático ha generado en los cultivos de maíz de los agricultores de subsistencia, a lo largo de las últimas décadas. Esto a través el avance en la investigación genética de los materiales de maíz nativos, y de esa forma disminuir la inseguridad alimentaria y promover la sostenibilidad ambiental en la región del Corredor Seco de Guatemala, mediante la innovación científica y tecnológica.

De tal manera, los resultados también contribuyen a los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): 2. Hambre cero y 13. Acción por el cambio climático. Esto ligado a la relación estrecha entre la investigación y la búsqueda del desarrollo de la población distribuida en el Corredor Seco de Guatemala, misma que se ve altamente afectada debido al cambio climático.

14. Vinculación

La investigación se realizó con la estrecha vinculación y colaboración con la Universidad Eslovaca de Agricultura en Nitra (SUA), mediante el trabajo conjunto de ambas instituciones en el análisis morfológico digital de los granos estudiados, utilizando el software estadístico *Ilastik*.

Posteriormente, se mantiene una vinculación con el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), debido a que las accesiones estudiadas en la presente investigación pertenecen a la colección de materiales de maíz de dicha institución.



Informe final de Proyecto de Investigación

15. Conclusiones

- 1) Los análisis multivariantes de componentes principales (*BiPlot*) son una herramienta estadística de importancia en programas de fitomejoramiento, para asociar características de la planta que permitan seleccionar materiales con caracteres deseables, como la tolerancia a estrés abiótico.
- 2) La evaluación fenotípica de campo sobre las 25 accesiones de maíz estudiadas, derivaron en resultados que están, en general, correlacionados con las evaluaciones de los análisis morfológicos digitales de grano; como también, con la integración de ambos resultados.
- 3) El análisis morfológico digital de grano posee gran importancia dentro de programas de mejoramiento genético de plantas, debido a que se estudia las características del grano a profundidad obteniendo datos exactos, mitigando el error dentro de los resultados; permitiendo integrar análisis de *machine learning* y preservando la integridad de la semilla.
- 4) A partir de los resultados obtenidos de la asociación de datos obtenidos en las dos fases de la investigación, se puede considerar que las accesiones 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18, 21 y 23; presentaron las características más favorables para tolerancia genética a sequía.

16. Recomendaciones

Continuar con las investigaciones relacionadas a las características deseables de accesiones nativas de maíz, relacionadas en el fitomejoramiento enfocado en la tolerancia genética a sequía.



Informe final de Proyecto de Investigación

Proseguir con el proyecto general de mejoramiento genético para la obtención de una variedad de maíz que posea tolerancia genética a la sequía, específica, para el Corredor Seco de Guatemala. Este proyecto general involucra una serie de fases que deben ser realizadas cada una en un tiempo y espacio específico.

Realizar pruebas de comportamiento de las accesiones de maíz, bajo condiciones de invernadero, simulando circunstancias climáticas semiáridas del Corredor Seco de Guatemala; que permita avanzar en la determinación del comportamiento idóneo de la planta ante condiciones hídricas adversas.



Informe final de Proyecto de Investigación

Referencias

- Albán, G. (2022). Generación de tecnología en el cultivo de maíz en Iberoamérica. ACI, avances en ciencias e ingenierías. Vol. 14. Universidad San Francisco de Quito: Educador. Recuperado de: <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/1091>
- Alfaro, E., & Cid, L. (1999). Análisis de las anomalías en el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y su relación con los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 6(1), 1–13.
- Bardales Espinoza, W. A., Castañón, C., & Herrera Herrera, J. L. (2019). Clima de Guatemala, tendencias observadas e índices de cambio climático. Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. Editorial Universitaria UVG.
- Benlioglu, B., and Ozkan, U. (2021). The influence of salinity and drought stress on some oat cultivars (*Avena sativa* L.) by determining some stress indexes and growth performances at the germination stage. *Fresen Environ. Bull.* 30, 771–778.
- Bi, C., Bi, X., Liu, J., Xie, H., Zhang, S., Chen, H., Wang, M., Shi, L., & Song, S. (2025). Identification of maize kernel varieties based on interpretable ensemble algorithms. *Frontiers In Plant Science*, 16, 1511097. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1511097>
- Bojórquez-Serrano, J. I., Vidal-Martínez, V. A., Álvarez-Bravo, A., & Coutiño-Estrada, B. (2020). Influencia del niño oscilación del sur sobre el rendimiento de maíz de temporal en Nayarit. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1413-1421. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2572>
- Brizuela, L.; Bolaños, J.; Córdova, H. (1996). Desarrollo y mejoramiento de germoplasma de maíz con tolerancia a sequía para las zonas tropicales de América
- Canul-Ku, Jaime, González-Pérez, Enrique, Barrios-Gómez, Edwin Javier, Pons-Hernández, José Luis, & Rangel-Estrada, Sandra Eloísa. (2022). Caracterización morfológica y agronómica de germoplasma de tomate nativo del sur de México. *Revista fitotecnia*



Informe final de Proyecto de Investigación

- mexicana, 45(1), 23-31. Epub 30 de diciembre de 2023.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.23>
- Castañón, G., Cruz, E., Del Pino, R., Panzo E., Montiel, M., Filobello, L. (2000). Selección de las líneas de maíz por resistencia a sequía. *Agronomía Mesoamericana*, ISSN-e 2215-3608, ISSN 1021-7444, Vol. 11, N°. 1, 2000. Recuperado de: <file:///C:/Users/aleja/Downloads/DialnetSeleccionDeLasLineasDeMaizPorResistenciaASequia-5546904.pdf>
- Central. Developing drought- and low N- tolerant maize. Proceedings of a Symposium. CIMMYT, El Batán, México. Recuperado de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/17389>
- Chavez, O. (2015). Situación del cultivo de maíz en Guatemala: principales limitaciones en la productividad. *ACI, avances en ciencias e ingenierías*. Vol. 14. Universidad San Francisco de Quito: Educador. DOI: <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2596>
- Chen, X., Li, F., Dong, S., Liu, X., Li, B., Xiao, Z., Deng, T., Wang, Y., Shen, S., & Zhou, S. (2022). Stubby or Slender? Ear Architecture Is Related to Drought Resistance in Maize. *Frontiers In Plant Science*, 13, 901186. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.901186>
- CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres), & Acción contra el Hambre. (2015). Protocolo nacional para la gestión integral del riesgo de desastres por canícula extendida en la República de Guatemala Elaborado por Programa de Emergencia por Desastres Naturales e Instituto de Sismología, Vulcanología Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Recuperado de: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0026/doc0026-parte01.pdf>
- Das, Shantanu & Sarma, Debojit & Chakraborty, Indrani & Roy, Nabarun & Das, Soumitra Sankar. (2017). *Principal Component Analysis in Plant Breeding*.
- Dehghani, H., Omidi, H., & Sabaghnia, N. (2008). Graphic Analysis of Trait Relations of Rapeseed Using the Biplot Method. *Agronomy Journal*, 100(5), 1443-1449. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0275>



Informe final de Proyecto de Investigación

- De Medeiros, A. D., Capobianco, N. P., Da Silva, J. M., Da Silva, L. J., Da Silva, C. B., & Dias, D. C. F. D. S. (2020). Interactive machine learning for soybean seed and seedling quality classification. *Scientific Reports*, 10(1), 11267. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68273-y>
- Delzon, S. (2015). New insight into leaf drought tolerance. *Functional Ecology*, 29(10), 1247-1249. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12500>
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295-1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- Fu X, Bai M, Xu Y, Wang T, Hui Z and Hu X, (2023) Cultivars identification of oat (*Avena sativa* L.) seed via multispectral imaging analysis. *Front. Plant Sci.* 14:1113535. doi:10.3389/fpls.2023.1113535
- Fuentes, M. R., van Etten, J., Ortega, A., y Vivero, J. L. (2005). Maíz para Guatemala: Propuesta para la Reactivación de la Cadena Agroalimentaria del Maíz Blanco y Amarillo, SERIE “PESA Investigación”, n°1. FAO Guatemala.
- Fonseca, A. E., Westgate, M. E., Grass, L., & Dornbos, D. L. (2003). Tassel Morphology as an Indicator of Potential Pollen Production in Maize. *Crop Management*, 2(1), 1-15. <https://doi.org/10.1094/cm-2003-0804-01-rs>
- Gabriel, K. R. (1971). The Biplot Graphic Display of Matrices with Application to Principal Component Analysis. *Biometrika*, 58(3), 453. <https://doi.org/10.2307/2334381>
- Geetha, V., Balamuruga, P., and Bhaskaran, M. (2011). Characterization of mustargenotypes through image analysis. *D Res. J. Seed Science.* 4, 192–198. doi: 10.3923/rjss.2011.192.198
- Grillo, O., Miceli, C., and Venora, G. (2011). Computerised image analysis applied to inspection of vetch seeds for varietal identification. *Seed Sci. Technol.* 39 (2), 490–500. doi: 10.15258/sst.2011.39.2.20
- Gándara Gaborit, J. L. (2018). Índice para la gestión de riesgo.
- Gangadhara, K., Yadav, L. P., Rao, V. V. A., Singh, A. K., Verma, A. K., Selvakumar, R., & Jat, G. S. (2023). Genetic diversity and principal component analysis in Indian bean



Informe final de Proyecto de Investigación

- (Lablab purpureus var. typicus L.) genotypes under rainfed conditions of Western India. *Genetic Resources And Crop Evolution*, 71(4), 1421-1434.
<https://doi.org/10.1007/s10722-023-01702-9>
- García-Lara, S., Chuck-Hernandez, C., & Serna-Saldivar, S. O. (2018). Development and Structure of the Corn Kernel. En *Elsevier eBooks* (pp. 147-163).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811971-6.00006-1>
- Hannah, L., Donatti, C.I., Harvey, C.A., Alfaro, E., Rodriguez, D.A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Diaz, F., Fung, E., Hidalgo, H.G., Imbach, P., Läderach, P., Landrum, J.P. and Solano, A.L. (2017). Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Clim Chang*.
doi:10.1007/s10584-016-1867-y
- Hallik, L., Niinemets, Ü., & Wright, I. J. (2009). ¿Are species shade and drought tolerance reflected in leaf-level structural and functional differentiation in Northern Hemisphere temperate Woody flora? *New Phytologist*, 184(1), 257-274.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02918.x>
- Hidalgo, J. M. S., Chamorro, J., Palomares, J. M., Gámez, J. C., & Olivares, J. (2013). Aplicación de PCA y técnicas bayesianas a la clasificación de píxeles basada en color.
<https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/view/1211>
- ICTA. (2019). Instituto de Ciencia y Tecnología ICTA. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola. Recuperado 22 de abril de 2022, de <https://www.icta.gob.gt/maiz>
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH. (2023). Perspectiva Climática Cuatrimestral DEFM 2023-2024. Recuperado de: https://insivumeh.gob.gt/wpcontent/uploads/2023/11/perspectivaClimatica_DEFM2023_insivumeh.pdf
- Kamara, A. Y., Menkir, A., Badu-Apraku, B., & Ibikunle, O. (2003). The influence of drought stress on growth, yield and yield components of selected maize genotypes. *The Journal Of Agricultural Science*, 141(1), 43-50.
<https://doi.org/10.1017/s0021859603003423>



Informe final de Proyecto de Investigación

- Kučka, M.; Ražná, K.; Harenčár, L.; Kolarovičová, T. Plant Seed Mucilage—Great Potential for Sticky Matter. *Nutraceuticals* 2022, 2, 253–269. <https://doi.org/10.3390/nutraceuticals2040019>
- Lima, D. C., De Leon, N., & Kaeppler, S. M. (2022). Utility of anthesis–silking interval information to predict grain yield under water and nitrogen limited conditions. *Crop Science*, 63(1), 151-163. <https://doi.org/10.1002/csc2.20854>
- Marín-Montes I. M., R. Lobato-Ortiz, G. Carrillo-Castañeda, J. E. Rodríguez-Pérez, J. J. García-Zavala, M. Hernández-Rodríguez y A. M. Velasco-García (2020) Parámetros genéticos de una cruce interespecífica de *S. lycopersicum* L. y *S. habrochaites* Knapp & Spooner. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 26:111-123, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.01.003>
- McCormick. (2020). All the latest data on maize production around the world. Recuperado 22 de abril de 2022, de <https://www.mccormick.it/as/all-the-latest-data-on-maize-production-around-the-world/>
- Mesa Técnica Agroclimática -MTA-. (2024). BOLETÍN AGROCLIMÁTICO N.º 10 - Mesa Técnica Agroclimática - Zacapa. Recuperado de: <https://asorech.org.gt/wp-content/uploads/2023/05/Boletin-10-zacapa-1-2.pdf>
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación – MAGA-. (2016). El Agro en Cifras. Dirección de Planeamiento DIPLAN. p. 69
- Ministerio de Agricultura y Ganadería -MAGA-. (2002). Estimación de Amenazas Inducidas por Fenómenos Hidrometeorológicos en la República de Guatemala. Recuperado de: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0026/doc0026-parte01.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales -MARN-. (2021). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. Recuperado de: <file:///C:/Users/aleja/Downloads/Tercera-Comunicacion-Nacional-sobre-Cambio-Climatico.pdf>
- Morales, M. (2018). Más de Q80 millones en cultivos se pierden por la sequía en Chiquimula. Prensa Libre. Recuperado 22 de abril de 2022, de



Informe final de Proyecto de Investigación

<https://www.prensalibre.com/ciudades/chiquimula/mas-de-q80-millones-en-cultivos-se-pierden-por-la-sequia-en-chiquimula/>

Mueller, G. M. (2011), "Corn and Culture: The Influence of *Zea mays* across Cultural and Historical Boundaries". Undergraduate Theses and Professional Papers. 8. <https://scholarworks.umt.edu/utpp/8>

Ogunniyan, D.; Adetumbi, J.; Olosoji, J.; Makinde, J. (2021). THE VARIABILITY OF GRAIN YIELD, SEED MORPHOMETRIC AND VIGOUR TRAITS OF EARLY MATURING HYBRID MAIZE. Journal of Agricultural Sciences(Belgrade)Vol. 66, No. 2, Pages105-119 <https://doi.org/10.2298/JAS2102105OUDC:633.15:631.527>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO-. (2020). Combatir la sequía con técnicas ancestrales. Recuperado de: <https://www.fao.org/guatemala/programas-y-proyectos/historias-de-exito/combater-la-sequia-con-tecnicas-ancestrales/en/>

Pons, D., Castellanos, E., Conde, D., Brincker, J., Incer, D., López, A. (2018). Escenarios de aridez para Guatemala para los años 20^a, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático. Revista Yu'am 2(4): 4-16 pp.

Rivera, P. (2016). Sequía, Canícula y Cambio Climático en Guatemala. Recuperado de <https://www.entremundos.org/revista/medio-ambiente/sequia-canicula-y-cambio-climatico-en-guatemala/>

Rocandio-Rodríguez, Mario, Santacruz-Varela, Amalio, Córdova-Téllez, Leobigildo, López-Sánchez, Higinio, Castillo-González, Fernando, Lobato-Ortiz, Ricardo, García-Zavala, J. Jesús, & Ortega-Paczka, Rafael. (2014). Caracterización morfológica y agronómica de siete razas de maíz de los Valles Altos de México. Revista fitotecnia mexicana, 37(4), 351-361. Recuperado en 20 de septiembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018773802014000400008&lng=es&tlng=es.



Informe final de Proyecto de Investigación

- Sacomanno, B., Wallace, M., O'Sullivan, D. M., and Cockram, J. (2020). Use of genetic markers for the detection of off-types for DUS phenotypic traits in the inbreeding crop, barley. *Mol. Breeding*. 40 (1), 13. doi: 10.1007/s11032-019-1088-y
- Salvador-Reyes, R., Rebellato, A. P., Pallone, J. A. L., Ferrari, R. A., & Clerici, M. T. P. S. (2021). Kernel characterization and starch morphology in five varieties of Peruvian Andean maize. *Food Research International*, 140, 110044. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110044>
- Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional de la Presidencia de la República - SESAN-. (2020). Agua, cambio climático y su impacto en la SAN. Recuperado de: <https://portal.sesan.gob.gt/2020/03/22/agua-cambio-climatico-y-su-impacto-en-la-san/>
- Silva, W., Alfaro, Y., Jiménez, R. (2010). Evaluación de las características morfológicas y agronómicas de cinco líneas de maíz amarillo en diferentes fechas de siembra. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela (UCV), Maracay, estado Aragua, Venezuela e Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Recuperado de: <file:///C:/Users/aleja/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeLasCaracteristicasMorfologicasYAgronom-3393591.pdf>
- Smykalova, I.; Grillo, O.; Bjelkova, M.; Hybl, M.; Venora, G. (2011). Morpho-colorimetric traits of Pisum seeds measured by an image analysis system. *Seed Science and Technology*, Volume 39, Number 3, pp. 612-626(15). DOI: <https://doi.org/10.15258/sst.2011.39.3.08>
- Tarazona, B. E., R, C. L. S., Arias, C. G. C., Ascanio, J. G., V., & N, J. J. V. (2020). Detection of structural alterations in metal bodies: An approximation using Fourier transform and principal component analysis (PCA). *Scientia Et Technica*, 25(2), 255-260. <https://doi.org/10.22517/23447214.2350>
- Tu, K., Wen, S., Cheng, Y., Xu, Y., Pan, T., Hou, H., Gu, R., Wang, J., Wang, F., & Sun, Q. (2022). A model for genuineness detection in genetically and phenotypically similar



Informe final de Proyecto de Investigación

maize variety seeds based on hyperspectral imaging and machine learning. *Plant Methods*, 18(1), 81. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00918-7>


Uddin, M.N., Hossain, M.A. and Burritt, D.J. (2016) Salinity and drought stress: similarities and differences in oxidative responses and cellular redox regulation. *Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach*. 1-2



Informe final de Proyecto de Investigación

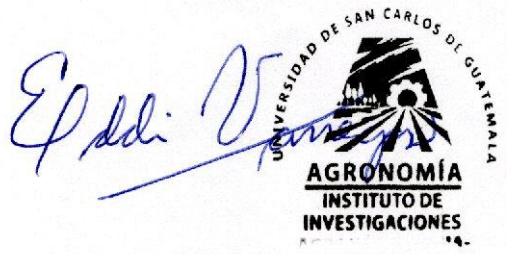
Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

PhD Carlos Alfonso Orozco Castillo	
Fecha: 27 de febrero de 2026	

Aval del director del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto “Análisis morfológico-digital de grano y evaluación fenotípica en líneas preseleccionadas de maíz (*Zea mays* L.) para tolerancia genética a sequía”. en mi calidad de Director del Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales -IIAA-, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. PhD Eddi Alejandro Vanegas Chacón Director IIAA	
Fecha: 27 de febrero de 2026	



Informe final de Proyecto de Investigación

Recepción de la Dirección General de Investigación

<p>Vo.Bo. Inga. Liuba Cabrera Coordinadora Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición –PRUNIAN–</p>	
<p>Fecha: 27 de febrero de 2026</p>	

/Digi2025