

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Selección de Genotipos de Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) por Caracterización Agronómica y Rendimiento de Grano

Por:

**ITZEL JIMÉNEZ DESAIDA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Selección de Genotipos de Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), por Caracterización Agronómica y Rendimiento de Grano

Por:

**ITZEL JIMÉNEZ DESAIDA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Antonio Flores Naveda  
Asesor Principal



Dr. Edgar Omar Rueda Puente  
Asesor Principal Externo



Dra. Xochitl Ruelas Chacón  
Coasesor



Dra. María Alejandra Torres Tapia  
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2025

## Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior, me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Itzel Jiménez Desaida

## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

Por ser mi guía y fortaleza, quien me ha sostenido en cada paso de este camino. Gracias por darme la perseverancia para enfrentar los desafíos de estudiar lejos de casa, por darme fuerzas cuando la ansiedad parecía más fuerte que mi voluntad y por recordarme que no estoy sola que por más pequeño que fuera el paso, siempre tenía un propósito en mi vida.

### **A mi amada madre:**

## **Yolanda Desaida Flores**

Cuyo amor ha sido mi faro aun en la distancia. Cada logro de esta tesis lleva tu nombre, porque fue tu sacrificio, tu paciencia y tu fe en mí lo que me permitió seguir adelante cuando la nostalgia y la soledad me pesaban. Gracias por enseñarme a luchar, por consolarme en la distancia y por recordarme que, aunque lejos de casa, siempre llevo tu abrazo y tu fuerza conmigo. Esta obra es un humilde reflejo del amor infinito que me has dado y de todo lo que me inspiras cada día. Te amo.

### **A mi abuelo:**

## **Celso Desaida Duran †**

A mi querido abuelo, más que un abuelo, mi mejor amigo y mi guía. Gracias por enseñarme a amar la tierra y a los animales, a respetar la naturaleza y a perseguir mis sueños con pasión y dedicación. Cada paso en esta carrera lleva tu huella, y cada logro de esta tesis es un homenaje a ti. Aunque ahora estés en el cielo, tu ejemplo, tu cariño y tus enseñanzas siguen acompañándome en cada decisión y en cada triunfo. Te llevo siempre en mi corazón.

**A mi padre:**

**Francisco Javier Jiménez Carmona**

A mi querido padre, cuyo apoyo incondicional y sacrificio económico hicieron posible que hoy alcance este logro. Gracias por creer en mí y por enseñarme con tu ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. Esta tesis es un reflejo de tu generosidad, tu dedicación y tu amor constante.

**A mis padres:**

**Hilda Flores Rivera †, Otilia Desaida Flores, Adilene Sánchez Roldán, Jorge Sánchez Cedillo, Gloria Roldán Oliveros, Ana Desaida Flores y Damián Rivera Desaida.**

Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles y mi alegría en los días difíciles. Por apoyarme siempre y llenarme de amor infinito, amor que me dio la confianza de seguir hacia adelante sin tambalear, su apoyo, valores y enseñanzas impartidos me apoyaron a enfrentar las metas planteadas hasta cumplirlas. Cada logro mío lleva consigo su amor y su fe en mí.

**A mis hermanos:**

**Brenda Sánchez Roldán y Fernando Desaida Sánchez.**

No hay palabras suficientes para expresar la gratitud y el amor que siento por ustedes. Gracias por ser mi apoyo constante, por celebrar conmigo cada logro y por levantarme en cada tropiezo. Su compañía, sus consejos, sus bromas y hasta sus regaños han sido fundamentales para formar la persona que soy hoy. Cada logro en esta tesis lleva un pedacito de ustedes.

**A mi familia:**

**Karen Castillo Desaida, Paola Desaida Robles, Maricela Sánchez Flores, Nahomi Balderas Sánchez, Leticia Flores**

**Mendoza, Ximena Castro Sánchez, Mateo Castro Sánchez  
y Fernando Desaida Amante.**

Esta tesis es un pequeño reflejo de todo lo que ustedes me han dado. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, mi alegría en los días felices y mi guía en cada decisión. Su amor incondicional y su apoyo constante han sido la luz que ha iluminado mi camino, incluso cuando las dudas y los desafíos parecían insuperables.

**A mis mejores amigas:**

**Tiffani Marlen Ledesma Ramirez, Guadalupe Hernández  
Solís y María José Rodríguez Cantero**

Gracias por caminar conmigo en esta etapa, por compartir risas, lágrimas y los silencios que también fueron compañía. Gracias por estar ahí cuando necesitaba una palabra, una mirada o simplemente una presencia. Por recordarme que no tenía que poder con todo sola, y que apoyarme en ustedes también era una forma de ser fuerte.

**A mi novio:**

**José Guadalupe García García**

Gracias por estar a mi lado en cada paso de este camino, por tu apoyo incondicional y tus palabras que me han dado fuerza. Cada logro de esta tesis lleva consigo tu compañía, tus ánimos y el amor que me das día tras día. Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba, por compartir mis alegrías y por hacer que los días difíciles se vuelvan más llevaderos con tu cariño y comprensión.

**“A ustedes, que me han acompañado en cada momento,  
dedico este logro con amor eterno.”**

## AGRADECIMIENTOS

“Existen personas, hechos y recuerdos que se deben dejar en el pasado, pero existen personas, hechos y recuerdos que siempre valdrán la pena ser rescatados.”

-Dora Díaz, Bitácora de una estrella-

A mi “**ALMA MATER**”, la gloriosa Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por brindarme no solo la oportunidad de formarme profesionalmente, sino también por haber sido mi segundo hogar durante estos años lejos de mi estado y de mi familia. Ser estudiante foránea no fue sencillo, sin embargo, encontré en esta institución un espacio donde pude crecer, aprender y descubrir quién soy y lo capaz que puedo ser, rodeada de personas que, aunque en un principio eran desconocidas, hoy forman parte de mi historia.

A mis **Profesores** por su dedicación y sus consejos, por compartir sus conocimientos y experiencias con pasión por su profesión, para formarnos como unos profesionistas comprometidos con el campo y con su gente.

A mi asesor de tesis el **Dr. Antonio Flores Naveda** por su invaluable orientación, dedicación y apoyo durante todo el desarrollo de este trabajo. Agradezco no solo su tiempo y conocimientos, sino también su confianza en mí incluso cuando yo misma dudaba.

Al **Dr. Armando Muñoz Urbina** por su paciencia, por cada palabra de aliento en los momentos de duda y por la firmeza con la que supo orientarme cuando más lo necesitaba. Su compromiso y pasión por el conocimiento fueron pieza clave para la realización de mi tesis.

Quisiera manifestar mi más profundo agradecimiento a los doctores; **Edgar Omar Rueda Puente, María Alejandra Torres Tapia y Xochitl Ruelas Chacón** que integraron mi comité de asesoría durante el proceso de obtención de mi título universitario. Su guía, experiencia y disposición para compartir sus conocimientos

fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para mi formación profesional.

A mis roomies **Guadalupe, Anahí, María José, Wendy, Francisco y Jesús** que más que unos compañeros de techo, se convirtieron en mis compañeros de vida durante esta etapa tan especial. Gracias por ser mi familia lejos de casa, por compartir no solo el espacio, sino también risas, comidas improvisadas, y sobre todo por apoyarme en aquellos momentos donde la ansiedad me superaba, por celebrar mis pequeñas victorias y por simplemente estar ahí, siendo ustedes.

A mis amigos **Tiffani, Dayana, Mayra, Jackeline, Daniel, David, Ana, Iván, Jesús, Erubey, Manuel, Kevin y Juan**, quienes se convirtieron en mi segunda familia lejos de casa, no tengo palabras suficientes para agradecerles todo lo que significaron durante estos años. Gracias por estar ahí en los momentos difíciles, por los abrazos sinceros, por las risas que aliviaban el cansancio y por acompañarme en cada paso de este camino. Llegar hasta aquí no fue fácil, pero tenerlos a ustedes hizo que cada día valiera la pena.

**A todos ustedes, con todo mi corazón:  
¡Gracias por estar, por quedarse y ser parte de esta historia!**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general .....	3
1.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis .....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Origen del cultivo del sorgo .....	4
2.2 Importancia del cultivo de sorgo .....	5
2.3 Producción mundial del sorgo.....	6
2.4 Producción nacional de sorgo.....	8
2.5 Clasificación taxonómica .....	10
2.6 Bancos de germoplasma .....	11
2.7 ICRISAT.....	13
2.8 Conservación in situ .....	14

2.9	Conservación ex situ.....	15
3.	Morfología de la planta.....	16
3.0.1	Sistema radicular .....	16
3.0.2	Tallo.....	16
3.0.3	Hojas.....	17
3.0.4	Inflorescencia .....	17
3.0.5	Semilla.....	17
3.1	Etapas de crecimiento y desarrollo .....	18
3.1.1	Germinación .....	18
3.1.2	Emergencia.....	18
3.1.3	Crecimiento vegetativo .....	19
3.1.4	Floración.....	19
3.1.5	Llenado de grano .....	19
3.1.6	Madurez.....	19
3.4	Principales plagas .....	20
3.4.1	Mosquita del sorgo ( <i>Contarinia sorghicola</i> ) .....	20
3.4.2	Gusano cogollero ( <i>Spodoptera frugiperda</i> ) .....	21
3.4.3	Gusano soldado ( <i>Spodoptera exigua</i> ) .....	22
3.4.4	Pulgón amarillo del sorgo ( <i>Melanaphis sacchari</i> ).....	23
3.4.5	Barrenador del tallo ( <i>Diatraea saccharalis</i> ) .....	24
3.5	Principales enfermedades .....	25
3.5.1	Roya del sorgo ( <i>Puccinia sorghi</i> ) .....	25

3.5.2 Tizón de la panoja ( <i>Fusarium moniliforme</i> ) .....	26
3.5.3 Antracnosis ( <i>Colletotrichum graminicola</i> ) .....	27
3.5.4 Mancha foliar zonada ( <i>Gloeocercospora sorghi</i> ) .....	28
3.5.5 Mildiu velloso ( <i>Peronosclerospora sorghi</i> ).....	29
3.6 Usos del sorgo.....	30
3.7 Valor agregado.....	31
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1 Localización del sitio experimental .....	32
3.2 Germoplasma utilizado .....	34
3.3 Manejo agronómico del cultivo .....	35
3.3.1 Preparación del terreno.....	35
3.3.2 Siembra.....	35
3.3.4 Fertilización.....	35
3.3.5 Control de malezas .....	36
3.3.6 Manejo de plagas y enfermedades .....	36
3.3.7 Cosecha .....	36
3.3.8 Trilla .....	36
3.4 Variables evaluadas .....	37
3.4.1 Altura de la planta (AP) .....	37
3.4.2 Longitud de panícula (LP) .....	37
3.4.3 Longitud de excursión (LE) .....	37
3.4.4 Diámetro del tallo (DT).....	37

3.4.5 Longitud de hoja (LH).....	37
3.4.6 Ancho de hoja (AH) .....	38
3.4.7 Días a floración (DF).....	38
3.4.8 Sólidos solubles totales (SST).....	38
3.4.9 Rendimiento de grano por planta (RTO) .....	38
3.4.10 Enfermedades foliares (EF).....	38
3.5 Análisis estadísticos.....	39
3.5.1 Análisis univariado.....	39
3.5.2 Análisis multivariado .....	40
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
4.1 Análisis de varianza.....	44
4.2 Prueba de medias .....	44
4.3 Análisis de varianza (SST) .....	46
4.4 Prueba de medias (SST).....	46
4.5 Análisis de Componentes Principales (ACP) .....	47
V. CONCLUSIONES .....	51
VI. LITERATURA CITADA .....	53
VII. APÉNDICE.....	61

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica del cultivo del sorgo. ....	10
Cuadro 2. Características del ensayo y parcela experimental.....	33
Cuadro 3. Líneas experimentales de sorgo evaluadas en el Campo Experimental de la UAAAN ciclo P-V. 2024. ....	34
Cuadro 4. Cuadrados medios y coeficientes de variación de las variables agronómicas de 12 genotipos de sorgo en el ciclo P-V 2024.....	44
Cuadro 5. Análisis comparativo de las medias para las variables agronómicas de 12 genotipos de sorgo, organizados en función a la variable de rendimiento. ....	45
Cuadro 6. Cuadrados medios y coeficientes de variación de la variable Sólidos Solubles Totales de los primeros 5 genotipos de sorgo en el ciclo P-V 2024. ....	46
Cuadro 7. Análisis comparativo de las medias para las variables agronómicas de 12 genotipos de sorgo, organizados en función a la variable de rendimiento. ....	47
Cuadro 8. Valores y vectores propios para tres primeros componentes principales de 9 variables agronómicas evaluadas en 12 genotipos de sorgo en Ciclo P-V 2024 UAAAN. ....	48
Cuadro 9. Correlaciones fenotípicas entre las variables evaluadas en 12 genotipos de sorgo Ciclo P-V 2025 UAAAN.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales países productores de sorgo. ....	6
Figura 2. Principales países productores de sorgo en miles de toneladas.....	7
Figura 3. Principales estados productores de sorgo en toneladas. ....	8
Figura 4. Producción y consumo nacional de sorgo. ....	9
Figura 5. Partes de la planta de sorgo. ....	16
Figura 6. Etapas fenológicas de la planta de sorgo. ....	18
Figura 7. Ovipostura de hembras en grano de sorgo en formación de sorgo.....	20
Figura 8. Larvas alimentándose de las cariósides del sorgo. ....	21
Figura 9. Larva de <i>Spodoptera exigua</i> . ....	22
Figura 10. Aspecto general del pulgón amarillo del sorgo. ....	23
Figura 11. Larva de <i>Diatraea saccharalis</i> . ....	24
Figura 12. Roya. A. Ataque en hojas y tallo. B. Uredinios en hoja. C. Urediniosporas de <i>Puccinia purpurea</i> . ....	25
Figura 13. Panoja de sorgo con mielecilla, síntoma de la enfermedad en su forma asexual.....	26
Figura 14. Pudrición por antracnosis en tallo. ....	27
Figura 15. Síntoma de la mancha foliar zonada en muestras de campo de sorgo.....	28
Figura 16. Hoja de sorgo infectada con mildiu vellosa. ....	29
Figura 17. Fachada e interior del invernadero No. 5 (UAAAN). ....	32
Figura 18. Distribución de los tratamientos en las camas del invernadero No. 5.....	33
Figura 19. Color de la testa del grano de los 12 genotipos de sorgo. ....	42
Figura 20. Grafica biplot de las variables-vector y dispersión de genotipos de sorgo en los dos primeros componentes principales.....	49
Anexo 1. Fotografías de los trabajos realizados durante el experimento .....	61

## RESUMEN

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cultivos de cereales más importantes para la producción de granos y forraje. En México, ocupa el tercer lugar en superficie sembrada con aproximadamente 1.3 millones de hectáreas. En la actualidad la producción nacional de sorgo se ha visto afectada, debido a la limitada disponibilidad de variedades mejoradas adaptadas a las distintas zonas agroecológicas del país. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue seleccionar genotipos de sorgo por variables agronómicas y rendimiento de grano en Invernadero para incremento de semilla. El experimento se estableció en el Ciclo Primavera-Verano 2024 en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicada e Buenavista, Saltillo, Coahuila en un invernadero tipo túnel de mediana tecnología, bajo un diseño completamente al azar. El germoplasma estuvo constituido por 12 genotipos de sorgo del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas del Departamento de Fitomejoramiento de la UAAAN. Las variables evaluadas fueron: rendimiento del grano (REND), días a floración (DF), altura de planta (AP), longitud de panícula (LP), longitud de excursión (LE), diámetro del tallo (DT), longitud de la hoja (LH), ancho de la hoja (AH), enfermedades foliares (EF) y sólidos solubles totales (SST). La variable cualitativa del germoplasma evaluado fue el color de la testa del grano. Los datos se evaluaron bajo el diseño completamente al azar con dos repeticiones, incluyendo la prueba de medias (Tukey $\leq$ 0.05). Además, se efectuó un análisis multivariado de componentes principales que incluyó los genotipos de sorgo y las variables evaluadas, utilizando el paquete estadístico Minitab 16.

Con base en el resultado de la variable cualitativa del color de la testa del grano, se determinó que predominó el color rojo con un 75% seguido del blanco con 16.66% y una representación mínima de color negro con 8.33%. El análisis de varianza completamente al azar mostró diferencias significativas ( $p\leq$ 0.05) y altamente significativas ( $p<$ 0.01) entre genotipos, para las variables agronómicas evaluadas, confirmando la existencia de diversidad genética. Se obtuvieron además

bajos coeficientes de variación con valores de 1.17 a 29.9%, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos. La prueba de medias de Tukey  $\leq 0.05$  permitió identificar al Gen 12 como el más precoz (DF=61) y de menor altura (AP=102.8 cm), mientras que el Gen 11 se destacó por su mayor número de días a floración (DF=93) y altura de planta (AP=213.3 cm), siendo el más tardío. Los genotipos 3 y 8 mostraron un desempeño superior en longitud de panícula (LP=37 y 35.1 cm) y una buena resistencia a enfermedades foliares (EF=1–3), ubicándolos dentro del rango de sanidad aceptable. En cuanto al rendimiento, los genotipos 2 (0.614 g pl<sup>-1</sup>), 3 (0.323 g pl<sup>-1</sup>) y 12 (0.316 g pl<sup>-1</sup>) superaron significativamente al resto, destacándose además por su mayor AH (8.2-9.8 cm) y menor LE (0.1-9.7 cm). El análisis de varianza para SST en los cinco primeros genotipos, mostró diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en la parte basal y significativas ( $p \leq 0.05$ ) en la parte superior, con bajos coeficientes de variación (7.55 a 11.95%). Según la prueba de Tukey  $\leq 0.05$ , el genotipo 4 presentó los valores más altos de SST en la parte basal (11.58 °GB) y en la parte intermedia (8.96 °GB). El análisis multivariado con dos componentes principales (ACP) explicó el 66.3% de la variación total de los datos. Las variables de mayor peso para CP1 fueron: AH y REND; mientras que para CP2 fue: AP y DF. Se observó una correlación negativa y altamente significativa entre AP y DT ( $r = -0.780^{**}$ ); positiva entre AH y LP ( $r = 0.697^{**}$ ) y negativa entre AH y LE ( $r = -0.742^{**}$ ). Además, EF se relacionó positivamente con LE ( $r = 0.626^*$ ) y negativamente con LP ( $r = -0.627^*$ ) y AH ( $r = -0.757^{**}$ ). El rendimiento se asoció positivamente con AH ( $r = 0.725^{**}$ ) y negativamente con LE ( $r = -0.808^{**}$ ).

Finalmente, los genotipos seleccionados fueron aquellos que presentaron mayores valores en cuanto a rendimiento, contenido de sólidos solubles totales, sanidad y color de grano siendo los genotipos de sorgo: 2 (UA-02), 3 (UA-03) y 12 (LES 291).

**Palabras clave:** Sorgo, Germoplasma, Caracterización agronómica, Análisis multivariado.

## I. INTRODUCCIÓN

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es una planta monocotiledónea con metabolismo fotosintético tipo C4, que forma parte de la familia *Poaceae*; dentro de esta, la subfamilia *Panicoideae* es comúnmente conocida como sorgo. Esta especie se cultiva para alimentación humana y como forraje para consumo animal. A nivel mundial, ocupa el quinto lugar entre los cultivos de cereales más importantes, después del arroz, el trigo, el maíz y la cebada. Representa una fuente alimenticia esencial para millones de personas en zonas tropicales y semiáridas, gracias a su eficiencia en el uso del agua y su tolerancia a condiciones climáticas adversas (FAO, 2008).

El sorgo es un cereal que crece en climas cálidos y tiene su origen en África, donde comenzó a cultivarse en zonas como Etiopía, desde hace más de cinco mil años. Su llegada a la India ocurrió hace unos cuatro mil años, y más tarde se expandió hacia China y el sur del continente africano, hace aproximadamente mil quinientos años. Este cultivo fue introducido en América del Norte, durante el siglo XVIII, en el contexto del comercio transatlántico de esclavos (SENA, 1990; Pérez, 2010).

Las variedades más comunes de sorgo utilizadas en la alimentación animal son grano pardo-amarillo, conocidas como sorgo blanco. Estas han sido seleccionadas por tener un bajo contenido de taninos y compuestos fenólicos, lo que las hace más adecuadas para este uso. Generalmente, se cultivan en regiones de clima templado (Gómez *et al.*, 2020). En cambio, las variedades de sorgo de color marrón oscuro presentan un alto nivel de taninos, los cuales se concentran en el pericarpio como mecanismo de defensa de la semilla, una característica distintiva frente a otros cereales. Estas variedades muestran mayor tolerancia a la sequía y suelen cultivarse en áreas áridas (Rodríguez y Pérez, 2018). Sin embargo, la presencia de taninos condensados dificulta la digestión, disminuyendo la

disponibilidad de energía y proteínas, por lo que estas variedades de grano oscuro son menos empleadas en la nutrición animal (López *et al.*, 2019).

Según datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2022), el estado de Coahuila se posiciona como el primordial productor de sorgo forrajero en México, con un volumen de 587,105 toneladas, lo que equivale al 19.3 % de la producción total nacional.

Numerosos autores afirman que para el año del 2050 existirá una gran demanda de granos de 450 mil toneladas anuales, lo que representa un déficit de 220 kg por hectárea, por lo que es obligatorio proyectar y elaborar estrategias que permitan obtener producciones con altos rendimientos (Pérez *et al.*, 2010).

Asimismo, se ha investigado sobre la aplicación de desechos orgánicos, acción que según (Chisi y Peterson *et al.*, 2018) es de importancia significativa, ya que la materia orgánica, principalmente el humus, es el sostén primordial para la vida en este intermedio; además de que puede precisar su potencial beneficioso. Al respecto, los fertilizantes orgánicos (humus de lombriz, gallinaza, entre otros), al igual que los minerales naturales y residuos, contienen compendios útiles para el mejoramiento de las propiedades físico-químicas del suelo y, por resultante, de los cultivos como productos naturales que aumentan la reserva de nutrientes en el suelo y conciben sustancias estimuladoras del crecimiento vegetal. Por la importancia que simboliza este cultivo, se efectuó el presente trabajo de investigación con los siguientes objetivos:

## **1.1 Objetivo general**

Seleccionar genotipos de sorgo por variables agronómicas y rendimiento de grano.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Evaluar variables agronómicas, días a floración, altura de planta y diámetro de tallo.
- Determinar la longitud de excursión y longitud de panícula en genotipos de sorgo.
- Estimar sólidos solubles totales y rendimiento de grano.
- Incremento de semilla de sorgo.

## **1.3 Hipótesis**

Hi. La selección de genotipos de sorgo, mediante caracterización agronómica y rendimiento de grano, permitirá obtener líneas con mayor potencial de rendimiento.

Ho. La selección de genotipos de sorgo, mediante caracterización agronómica y rendimiento de grano, no permitirá seleccionar líneas de sorgo con aceptable rendimiento de grano.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Origen del cultivo del sorgo

Las evidencias históricas mencionan que los cazadores-recolectores consumían sorgo ya en el año 8000 a. C. (Smith y Frederiksen *et al.*, 2000). La domesticación del sorgo tiene sus orígenes en Etiopía y los países vecinos, comenzando alrededor del 4000-3000 a. C. Numerosas variedades de sorgo se crearon mediante la práctica de la selección disruptiva, mediante la cual se produce la selección para más de un nivel de un carácter particular dentro de una población. Esto resulta de un equilibrio entre la selección de los agricultores para los rasgos cultivados y la selección natural para las características silvestres, generando tipos de sorgo mejorados, tipos silvestres y tipos intermedios (Doggett *et al.*, 1970).

Estos tipos mejorados de sorgo se propagaron a través del movimiento de personas y rutas comerciales a otras regiones de África, India (aproximadamente 1500–1000 a. C.), Oriente Medio (aprox. 900–700 a. C.) y finalmente al Lejano Oriente (aprox. 400 d. C.). Para cuando el sorgo se transportó a América, a finales del siglo XIX y principios del XX, la diversidad de nuevos tipos, variedades y razas de sorgo creadas a través del movimiento de personas, la selección disruptiva, el aislamiento geográfico y la recombinación de estos tipos en diferentes entornos habría sido grande (Wright, 1931; Doggett, 1970).

La domesticación inicial se habría centrado en la conversión de variedades silvestres con semillas pequeñas y dehiscentes a variedades mejoradas con semillas más grandes y resistentes. La selección disruptiva dio lugar a variedades de sorgo con características muy diferentes en altura, tipo de inflorescencia y, por supuesto, uso final (alimento, forraje, fibra, materiales de construcción), con el tiempo el sorgo ha sido descrito y redescrito por numerosos taxónomos, y actualmente se describe

en la familia Poaceae, tribu Andropogoneae, subtribu Sorghinae y género *Sorghum* Moench (Clayton y Renvoize, 1986).

## **2.2 Importancia del cultivo de sorgo**

El sorgo es un cultivo de gran importancia a escala mundial, pues es considerado el quinto cultivo más importante solo después del trigo, arroz, maíz y la cebada, siendo usado como un alimento básico en regiones de Asia, África y otras zonas, por lo que está comprobado que puede sustituir cereales como el trigo y el maíz en la alimentación humana y no solo en la producción de forraje o grano para alimentación animal como lo es en gran parte del mundo (Shen *et al.*, 2018).

El sorgo diversifica la dieta y promueve la salud humana a través de su composición nutricional y su potencial como alimento funcional. Entre los efectos fisiológicos ya investigados, el sorgo muestra una buena actividad antioxidante, una menor respuesta glucémica y mayores beneficios para la microbiota intestinal en comparación con otros cereales (Morais *et al.*, 2017).

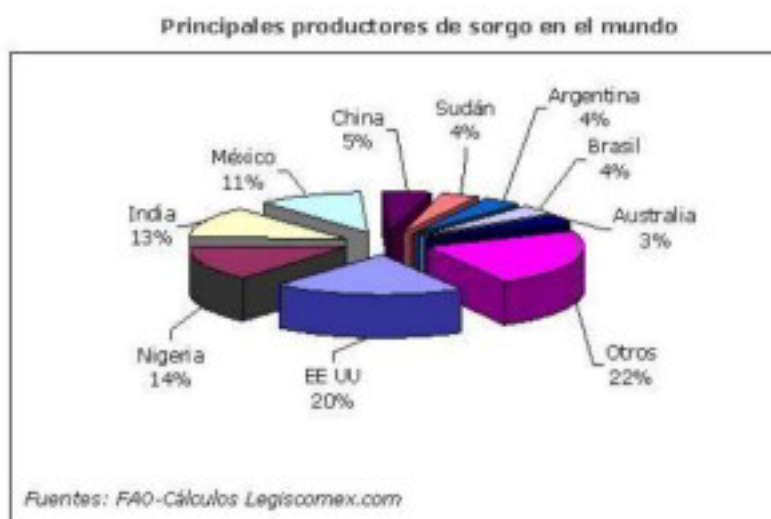
El gran crecimiento notorio del consumo de cereales integrales se ha correlacionado con la disminución de la incidencia de enfermedades crónicas no transmisibles, hecho que ha despertado cada vez más el interés de los investigadores en el estudio de cereales como el sorgo (Guo *et al.*, 2022).

Estudios indican que el sorgo diversifica la dieta y promueve la salud humana a través de su composición nutricional y su potencial como alimento funcional. Entre los efectos fisiológicos ya investigados, el sorgo muestra una buena actividad antioxidante, una menor respuesta glucémica y mayores beneficios para la microbiota intestinal en comparación con otros cereales (Anuniação *et al.*, 2018).

Además, el cultivo de sorgo es considerado un cultivo con bajo requerimiento de uso de agua y el poco uso de fertilizantes a diferencia de los otros cereales que se cultivan en el mundo. Considerando a su vez, que pueden resistir a estrés hídrico y suelos salinos.

## 2.3 Producción mundial del sorgo

El sorgo actúa como un alimento básico para millones de personas que viven en alrededor de 30 países en las regiones subtropicales y semiáridas de África y Asia. Aunque el cultivo de sorgo se reporta en más de 110 países (FAO, 2023), solo diez países (Estados Unidos, Sudan, Nigeria, México, India, Etiopia, China, Brasil, Australia y Argentina) tienen más de un millón de ha de área de sorgo, que juntos contribuyen a más del 68% de la producción total mundial de sorgo.



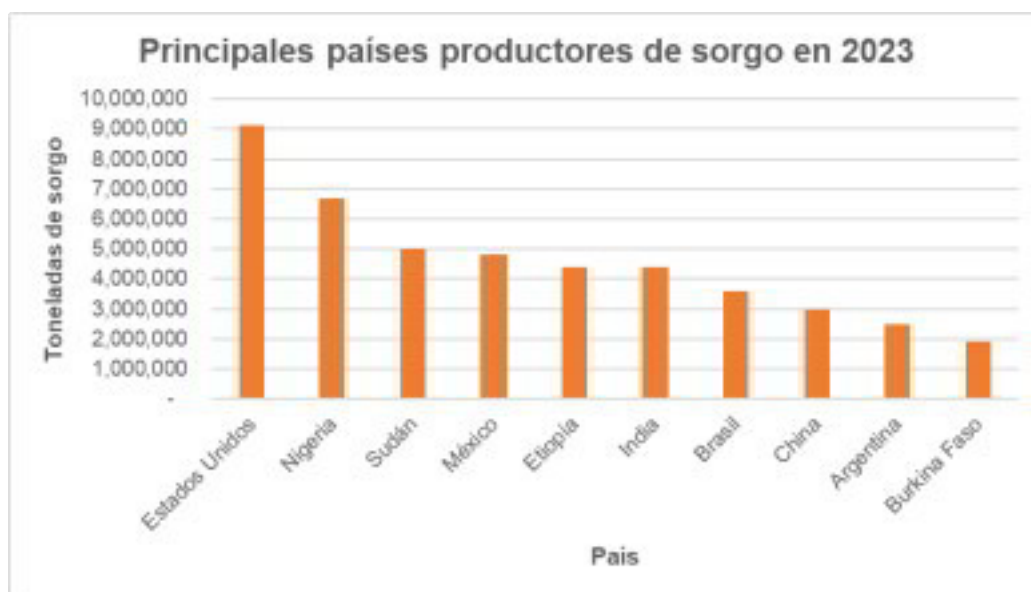
Fuente: FAO, 2023.

**Figura 1.** Principales países productores de sorgo.

La superficie dedicada al cultivo de sorgo a nivel mundial ha disminuido ligeramente en la última década, pasando de 41,79 millones de hectáreas en el período 2011-2013 a 39,9 millones de hectáreas. No obstante, la producción global se ha mantenido relativamente estable durante estos años. Esta estabilidad podría atribuirse a mejoras en el rendimiento del cultivo en distintas regiones. África encabeza la producción mundial de sorgo, representando el 46% del total, seguida por América con un 35%. De toda la producción, cerca del 47,5 % se destina al consumo humano, mientras que aproximadamente el 34,7 % se utiliza como alimento para animales. Los usos industriales y de semillas representan en conjunto alrededor del 10,5 %. El comercio internacional del sorgo está fuertemente influenciado por la

demanda del sector ganadero, especialmente por los requerimientos y precios de los alimentos para animales. Aunque la mayor parte del sorgo todavía se consume en los países productores, a pesar del potencial para ampliar su uso a nivel global, también enfrenta diversos retos que amenazan su desarrollo (Kumara *et al.*, 2024).

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en 2023 se generaron 60.01 millones de toneladas de sorgo a nivel mundial. Estados Unidos encabezó la lista de productores al alcanzar 8.071 millones de toneladas, lo que equivale al 13% de la producción global. En segundo lugar, se posicionó Nigeria, con una producción de 6.7 millones de toneladas, representando el 11% del total. Sudán ocupó el tercer puesto con 5 millones de toneladas, lo que constituye el 8% del total mundial. México también destacó con una producción de 4.8 millones de toneladas, lo que igualmente representa el 8% de la producción global, superando a países como Etiopía e India, cuya producción individual fue de 4.4 millones de toneladas cada uno (USDA, 2023).



Fuente: Bolsa de comercio de Rosario, 2023.

**Figura 2.** Principales países productores de sorgo en miles de toneladas.

La mejora genética orientada a desarrollar variedades más eficientes y resistentes podría disminuir las desigualdades en rendimiento y aumentar la productividad.

## 2.4 Producción nacional de sorgo

El sorgo es uno de los granos más importantes en México, debido a la diversidad de genotipos que existen y a sus diferentes usos y numerosas aplicaciones.

En 2011, la producción nacional de sorgo en México alcanzó 6.42 millones de toneladas, cantidad insuficiente para cubrir el consumo interno, que llegó a 8.8 millones de toneladas. Como resultado, fue necesario importar 2.38 millones de toneladas (FAO, 2015). Por otra parte, entre 1994 y 2012, la producción de sorgo en las diferentes regiones del país mostró variaciones significativas, con ciclos agrícolas caracterizados tanto por disminuciones como por incrementos en las cosechas, lo que impactó de manera distinta a cada región productora. En 1994, la participación de estados como Tamaulipas, Guanajuato, Michoacán y Sinaloa fue de 44.66%, 26.06%, 8.41% y 3.19%, respectivamente; mientras que para 2012 estas mismas entidades aportaron 40.29%, 21.46%, 10.24% y 6.53% del total nacional.



Fuente: SIAP, 2022.

**Figura 3.** Principales estados productores de sorgo en toneladas.

Las estadísticas de producción a nivel nacional de sorgo posicionan a Tamaulipas como el principal estado productor de este grano, en 2017 contribuyó con el 45.45% (2 205 mil toneladas) de la producción nacional equivalente a (4 853 mil toneladas). En la región norte del estado se encuentran las principales áreas productoras del grano (sorgo-maíz) con alta tecnificación, instalaciones de riego y áreas en situaciones de temporal. Su importancia socioeconómica reside en su aportación de 1 934 mil toneladas, equivalente al 87.71% de la producción estatal y con un valor tentativo de \$5 544.30 millones de pesos. Esta producción se consiguió en 615 420 ha cosechadas, distribuidas en tres Distritos de Desarrollo Rural (SAGARPA, 2018).

En el ciclo otoño-invierno se obtiene un 50% de su producción total y la otra mitad en el ciclo de primavera-verano. La región Noreste del país aporta 41.5% del volumen nacional y la centro-occidente participa con 35.7%. Tamaulipas pretende alcanzar la expectativa de 1.9 millones de tm al cierre de la cosecha, que representaría el 87% del volumen total anticipado para el año agrícola. Los excedentes de dicha entidad abastecen los requerimientos del sector pecuario de las zonas del Centro y Occidente del país, principalmente (GCMA, 2022).



Fuente: GCMA, 2022.

**Figura 4.** Producción y consumo nacional de sorgo.

## 2.5 Clasificación taxonómica

El nombre científico es *Sorghum bicolor* Moench y pertenece a la familia Poaceae con un ciclo de cultivo que varía los 90 y 120 días. Según Kimber (2013), la clasificación taxonómica del sorgo se representa de la siguiente manera:

**Cuadro 1.** Clasificación taxonómica del cultivo del sorgo.

<b>Reino</b>	<i>Plantae</i>
<b>Subreino</b>	<i>Tracheobionta</i>
<b>División</b>	<i>Magnoliophyta</i>
<b>Clase</b>	<i>Liliopsida</i>
<b>Orden</b>	<i>Poales</i>
<b>Familia</b>	<i>Poaceae</i>
<b>Subfamilia</b>	<i>Panicoideae</i>
<b>Subgénero</b>	<i>Sorghum</i> <i>Chaetosorghum</i> <i>Heterosorghum</i> <i>Parasorghum</i> <i>Stiposorghum</i>
<b>Especie del subgénero</b>	<i>Sorghum</i> <i>Sorghumpropinquum</i> <i>Sorghum halepense</i> <i>Sorghum bicolor</i>
<b>Subespecies de sp. s. <i>bicolor</i></b>	<i>Sorghum bicolor bicolor</i> <i>Sorghum bicolor drummondii</i> <i>Sorghum bicolor Verticilliflorum</i>
<b>Razas de subsp. s. <i>bicolor bicolor</i></b>	<i>Bicolor</i> Guinea Durra Kafir Caudatum

Fuente: Kimber, 2013.

El género *Sorghum* contiene entre 25 y 30 especies, de las cuales solo unas pocas son cultivadas. Las de mayor importancia son:

- ***Sorghum bicolor*** – sorgo cultivado, el más ampliamente usado para grano, forraje y etanol.
- ***Sorghum halepense*** – sorgo de Alepo (especie invasora en algunas regiones).
- ***Sorghum propinquum*** – especie silvestre usada en mejoramiento genético.

## 2.6 Bancos de germoplasma

Un banco de germoplasma es un lugar destinado a la preservación de la mayor variedad genética posible de especies utilizadas en la agricultura, la ganadería, la silvicultura, así como de microorganismos como hongos, bacterias y virus.

En México existe una estrategia enfocada en la conservación y el aprovechamiento de los recursos genéticos, cuyo propósito es proteger las especies que tienen relevancia económica, social y ambiental para el país. Esta estrategia busca garantizar su uso responsable y justo, tanto en el presente como en el futuro, apoyándose en el conocimiento científico y en tecnologías avanzadas. Esta tarea está a cargo del Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG), que se encarga de preservar la diversidad genética de especies clave para la alimentación, la ganadería, la pesca y el sector forestal, utilizando para ello Bancos de Germoplasma. Asimismo, promueve la conciencia sobre la importancia de conservar la diversidad genética, tanto en el ámbito científico como entre la sociedad en general (Avendaño, 2023).

Los Bancos funcionan como grandes almacenes donde se resguarda el material genético de distintas especies, a través de diferentes colecciones: de semillas, ADN y genómica, pecuarias y de tejidos vegetales. Su finalidad es implementar mecanismos que garanticen la conservación y disponibilidad de estos recursos a largo plazo. En particular, la colección de semillas concentra el 89% del

material conservado, compuesto principalmente por especies agrícolas de gran valor para la alimentación, como maíz, frijol, chile, arroz, amaranto, calabaza y jitomate.

En México, el INIFAP ha establecido el Banco de Germoplasma de Especies Forrajeras Tropicales en Santiago Ixcuitla, Nayarit, el cual resguarda más de 1,000 accesiones de gramíneas y leguminosas. Este banco representa un recurso estratégico para la alimentación animal en regiones tropicales y para enfrentar los efectos del cambio climático (INIFAP, 2023).

El sorgo es un cultivo fundamental en regiones áridas y semiáridas debido a su resistencia a condiciones climáticas extremas. En los bancos de germoplasma, se conserva una amplia diversidad genética de sorgo que permite desarrollar nuevas variedades con mejor rendimiento, resistencia a enfermedades y tolerancia a la sequía (INIFAP, 2022).

Los dos bancos de germoplasma de sorgo más grandes, el Instituto Internacional de Investigación de Cultivos para los Trópicos Semiáridos (ICRISAT) y el Sistema Nacional de Germoplasma de Plantas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-NPGS), albergan más de 41.000 accesiones, incluyendo accesiones históricas, parientes silvestres, razas locales y líneas de mejoramiento mejorado. Además, alrededor de otras 30 instituciones, como el Centro Australiano de Recursos Genéticos de Cultivos y Forrajes Tropicales, que alberga la colección más grande de sorgos silvestres australianos, la Oficina Nacional de Recursos Fitogenéticos en India con alrededor de 20.000 colecciones y el Instituto de Recursos de Germoplasma de Cultivos en China, que tiene alrededor de 16.874 colecciones. Según la forma de las espiguillas/panículas, estas accesiones de sorgo pueden clasificarse en cinco razas básicas y diez tipos intermedios (Dillon *et al.*, 2007).

La raza *Bicolor* es la más primitiva de las cinco razas, incluyendo sorgos forrajeros primitivos con tallos dulces; *Caudatum* es de origen más reciente; *Kafir* es insensible al fotoperiodo; *Guinea* es el grupo más antiguo y; *Durra* es el tipo de sorgo más importante en Etiopía (Cuevas *et al.*, 2017).

## 2.7 ICRISAT

El centro de investigación, conocido como el Instituto Internacional de Investigación sobre Cultivos para los Trópicos Semiáridos (ICRISAT), es una entidad internacional sin fines de lucro dedicada a la investigación agrícola orientada al desarrollo. Su trabajo se centra en mejorar la agricultura en regiones áridas y semiáridas, con el propósito de combatir la pobreza, el hambre y la desnutrición, al mismo tiempo que impulsa la sostenibilidad del medio ambiente y fomenta la inclusión social en estas zonas.

Basándose en un legado de innovación, el ICRISAT ha logrado numerosas primicias mundiales en el ámbito de la agricultura de secano. Algunos hitos notables incluyen el mapeo del código genómico del maní cultivado (el primero de su tipo), el lanzamiento del primer híbrido comercial de gandul en la India y la introducción del mijo perla biofortificado, pionero en África. Estas innovaciones, junto con otras, han desempeñado un papel fundamental en la obtención de resultados de desarrollo reales y tangibles para innumerables comunidades de secano, al proporcionar directamente sustento, nutrición y medios de vida, especialmente a mujeres, niños y personas en situación de vulnerabilidad (ICRISAT, 2025).

El banco de genes en ICRISAT, India, que sirve como repositorio mundial de germoplasma de sorgo, conserva 39.234 accesiones de 93 países, incluyendo 6249 de siete países del sur de Asia: Afganistán (6), Bangladesh (9), India (6101), Maldivas (10), Nepal (8), Pakistán (90) y Sri Lanka (25) (Upadhyaya *et al.*, 2017).

El ICRISAT, ha desarrollado programas de mejoramiento que buscan mejorar características específicas del sorgo, tales como la resistencia a plagas y enfermedades, la calidad nutricional y adaptación a situaciones de sequía. Un ejemplo destacado es el híbrido de forraje “CSH 24 MF”, desarrollado a partir de materiales genéticos conservados en la colección de germoplasma de ICRISAT, que combina características de rendimiento de grano y forraje, ofreciendo beneficios tanto para la producción de alimentos como para la alimentación animal (ICRISAT, 2025).

## 2.8 Conservación in situ

La diversidad genética, que se ha acumulado en todos los seres vivos del planeta a lo largo de unos tres mil millones de años de evolución, representa una parte esencial de los recursos genéticos de la Tierra. El objetivo de la conservación in situ es permitir a las especies y poblaciones evolucionar bajo presiones naturales, manteniendo la interacción con su ecosistema (Maxted *et al.*, 1997).

Además de ofrecer protección a las especies silvestres ante variaciones climáticas, del suelo u otras condiciones ambientales adversas (como plagas y enfermedades), los genes presentes en la naturaleza son fundamentales para que los cultivos puedan adaptarse a cambios en el ambiente y responder a nuevas demandas socioeconómicas. Esto incluye a las especies que conforman los 16 cultivos principales que actualmente sustentan la alimentación mundial.

El desarrollo y la mejora continua de estos cultivos, así como la incorporación de nuevas especies útiles, dependen de contar con suficiente diversidad genética que permita la creación de nuevas variedades a través de procesos de selección y mejoramiento genético. Los avances en el conocimiento y la tecnología genética incluida la ingeniería genética abre nuevas oportunidades para aprovechar material genético de una amplia gama de especies con el fin de mejorar las plantas cultivadas (FAO, 2010).

En el trópico de México, la conservación de forrajes como ensilaje se promueve como una alternativa para aumentar y mantener la producción de leche en el año. El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo de elección para producir ensilajes de alta calidad, pero este cultivo presenta desventajas durante los periodos de estrés hídrico. Bajo este escenario, el sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] se utiliza como cultivo alternativo para reemplazar el ensilaje de maíz, porque se puede sembrar tardíamente, es más eficiente en el uso del agua, tiene altos rendimientos de biomasa, aumenta la cobertura del suelo y tiene un menor requerimiento de nutrientes y pesticidas en comparación con el cultivo de maíz (Getachew *et al.*, 2016).

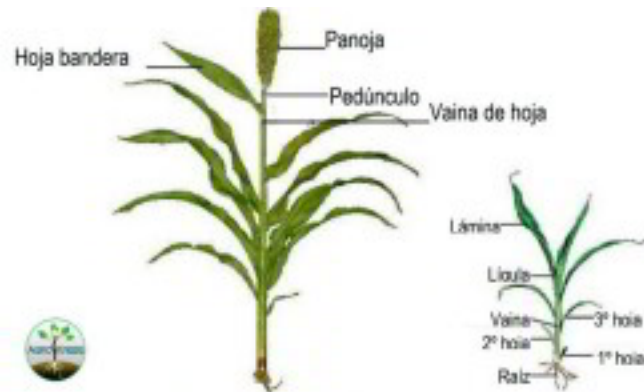
## 2.9 Conservación ex situ

La conservación ex situ es una estrategia clave para proteger especies en peligro fuera de sus entornos naturales. Esta modalidad incluye el uso de jardines botánicos, bancos de germoplasma, zoológicos y técnicas de criopreservación, y se considera un complemento a la conservación in situ. Si bien ofrece ventajas como la salvaguarda de especies, también enfrenta desafíos importantes, como la reducción de la diversidad genética (Heywood, 2017).

Los jardines botánicos desempeñan un papel central en la conservación ex situ y están bien posicionados para albergar un número cada vez mayor de especies de interés para la conservación. En conjunto, los jardines botánicos gestionan al menos 105.634 especies, incluyendo el 41% de las especies clasificadas como amenazadas. Estas instituciones emplean diversos tipos de colecciones ex situ, que se caracterizan por distintas ventajas y limitaciones. Entre ellas, los bancos de semillas son la forma más rentable y eficiente en cuanto a espacio de conservación ex situ para muchas especies. Sin embargo, los bancos de semillas no son apropiados para todas las especies. Es probable que al menos el 10% de las angiospermas y el 36% de las especies de plantas en peligro crítico produzcan semillas recalcitrantes, definidas como semillas que no sobreviven a los procesos de secado estándar que implican los bancos de semillas (Thomas *et al.*, 2022).

En las décadas de 1920 y 1930, los científicos (NI Vavilov y J. Harlan) se dieron cuenta de que las variedades de cultivos tradicionales se estaban perdiendo de los campos cultivados en todo el mundo. En consecuencia, los esfuerzos científicos para conservar la diversidad genética de las plantas comenzaron a centrarse en recolectar material y colocarlo en almacenamiento ex situ. Así, el establecimiento de bancos de genes (conservación ex situ) comenzó en el siglo XX a través del trabajo de Harrington en los Estados Unidos y Ellis y Roberts en el Reino Unido (Hong *et al.*, 1996). La viabilidad de las semillas se convirtió en un tema muy importante para las plantas de cultivo, y se demostró que las semillas sobreviven durante varias décadas cuando se almacenan en condiciones secas y de baja temperatura (Agacka *et al.*, 2014).

### 3. Morfología de la planta



Fuente: Agro Krebs, 2020.

**Figura 5.** Partes de la planta de sorgo.

#### 3.0.1 Sistema radicular

El sistema radicular del sorgo es profundo, bien desarrollado y altamente eficiente en la absorción de agua y nutrientes, lo que le permite adaptarse a condiciones de sequía y suelos pobres. Las raíces pueden alcanzar profundidades superiores a 1,5 metros, facilitando la exploración del perfil del suelo y dándole la capacidad para soportar condiciones de escasa disponibilidad hídrica, característica que lo diferencia de otros cereales cultivados en zonas áridas (Doggett, 1988).

#### 3.0.2 Tallo

El tallo del sorgo es erecto, sólido o semisólido, y presenta una estructura cilíndrica compuesta por varios entrenudos, lo que le da resistencia al acame y capacidad para almacenar agua y azúcares. Su altura varía según la variedad y las condiciones de cultivo, pudiendo alcanzar desde menos de un metro hasta más de cinco metros en algunas variedades forrajeras o sacarinas. Es una estructura robusta y versátil que puede adaptarse a distintas funciones fisiológicas, desde el soporte estructural hasta el almacenamiento de reservas energéticas, especialmente en las variedades de sorgo dulce (House, 1985).

### **3.0.3 Hojas**

Las hojas del sorgo son alargadas, lanceoladas y dispuestas de manera alterna a lo largo del tallo. Presentan una vaina que envuelve parcialmente el tallo, una lámina foliar ancha y una lígula membranosa en la unión entre vaina y lámina. El número y tamaño de las hojas varían según la variedad, pero en general, el sorgo puede producir entre 8 y 22 hojas por planta. Las hojas son similares a las del maíz, aunque generalmente más angostas, y su disposición favorece una buena captación de luz solar, lo cual contribuye a la eficiencia fotosintética de la planta (Vanderlip, 1993).

### **3.0.4 Inflorescencia**

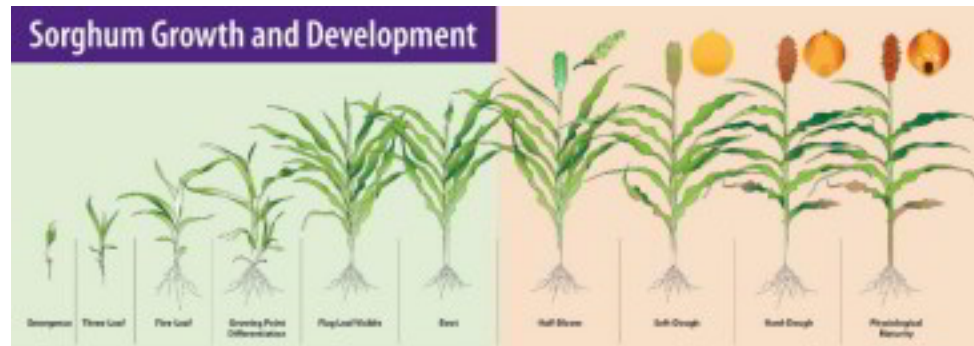
La inflorescencia del sorgo es una panícula terminal, generalmente erecta, aunque su forma, tamaño y grado de compactación varían ampliamente entre variedades. Puede ser laxa, intermedia o compacta, lo que influye en la aireación y en la susceptibilidad a enfermedades. Cada panícula está compuesta por múltiples espiguillas que contienen una flor fértil y, en algunos casos, una estéril. La variabilidad en la inflorescencia del sorgo es un rasgo clave para su clasificación y selección, ya que está estrechamente relacionada con la producción de grano y la resistencia a plagas y enfermedades (House, 1985).

### **3.0.5 Semilla**

La semilla del sorgo es un grano pequeño, redondeado u ovalado, cuya coloración puede variar del blanco al rojo oscuro, marrón o incluso negro, dependiendo de la variedad. Está compuesta por el pericarpio, el endospermo (rica fuente de almidón) y el embrión. Su tamaño, peso y dureza varían, características que influyen en su uso (alimenticio, forrajero o industrial) y en su resistencia al ataque de plagas. La composición del grano de sorgo, especialmente la proporción de almidón, proteínas y taninos, determina en gran medida su calidad nutricional y su aplicabilidad en la alimentación humana o animal (Rooney and Miller, 1982).

### 3.1 Etapas de crecimiento y desarrollo

El sorgo presenta diferentes fases de crecimiento y desarrollo, que van desde la germinación hasta alcanzar la madurez, y cada una de ellas presenta características y requerimientos particulares. Estas fases incluyen:



Fuente: Kansas State University, 2023.

**Figura 6.** Etapas fenológicas de la planta de sorgo.

#### 3.1.1 Germinación

La germinación del sorgo se inicia cuando la semilla absorbe agua, en un proceso llamado imbibición, lo que activa enzimas responsables de poner en marcha la respiración celular y movilizar las reservas almacenadas en el endospermo. Como resultado, emerge primero la radícula (la raíz inicial) y luego la plúmula. Este proceso suele ocurrir entre 24 y 72 horas después de la siembra, dependiendo de las condiciones de humedad y temperatura del suelo.

#### 3.1.2 Emergencia

Tiene lugar cuando el coleóptilo, logra salir a la superficie del suelo y entra en contacto con la luz. Este evento señala el final de la germinación y el inicio del crecimiento visible de la planta joven. Factores como la temperatura del suelo, la profundidad a la que se sembró la semilla y la disponibilidad de agua influyen directamente en este proceso.

### **3.1.3 Crecimiento vegetativo**

Este periodo se extiende desde la emergencia de la planta, hasta que aparece la hoja bandera. En esta fase, la planta crece de forma activa, formando hojas, tallos y raíces, y acumulando biomasa que será fundamental para la etapa reproductiva que sigue. La velocidad de crecimiento durante este tiempo está determinada por factores como la temperatura, la disponibilidad de agua, los nutrientes y la cantidad de luz solar recibida.

### **3.1.4 Floración**

Esta fase es crucial en el ciclo reproductivo del sorgo, ya que es cuando las flores se abren y tiene lugar la polinización. Normalmente, el proceso inicia en el centro de la panícula y avanza hacia la parte superior e inferior en un lapso de 4 a 7 días. Durante este periodo, la planta es muy vulnerable a factores de estrés como la sequía o las altas temperaturas, los cuales pueden reducir la fertilidad y limitar la formación de granos.

### **3.1.5 Llenado de grano**

Ocurre después de la floración y concluye con la llegada a la madurez fisiológica. En este periodo, los granos ya formados comienzan a almacenar almidón, azúcares, proteínas y otros nutrientes, lo cual influye directamente en su peso final y en la productividad del cultivo. Este proceso generalmente se extiende por un período de 30 a 40 días, dependiendo de la variedad cultivada y de las condiciones del entorno. Para que esta fase sea exitosa, es fundamental contar con suficiente agua y una adecuada disponibilidad de nutrientes especialmente nitrógeno.

### **3.1.6 Madurez**

Es la etapa final del ciclo de desarrollo del cultivo, en la cual los granos alcanzan su máximo contenido de materia seca y están listos para la cosecha. La madurez fisiológica se caracteriza por la pérdida de humedad en los granos y la acumulación máxima de nutrientes, determinando así la calidad y el rendimiento final del cultivo (Borrell *et al.*, 2014). Según Blum (2004), la madurez del sorgo puede evaluarse mediante indicadores visuales y fisiológicos, como el endurecimiento de la cubierta del grano y la reducción del contenido de humedad al 30-35%.

### 3.4 Principales plagas

#### 3.4.1 Mosquita del sorgo (*Contarinia sorghicola*)

Este díptero es una plaga importante en cultivos de sorgo, causando daños directos a las panículas y reduciendo el rendimiento y la calidad del grano.

La mosquita del sorgo deposita sus huevos en las flores del sorgo, donde las larvas se alimentan de los tejidos florales y de los granos en formación. Esto provoca deformaciones, caída de flores y formación de granos dañados o vacíos (Patel y Sharma, 2006). El ciclo de vida varía según las condiciones climáticas, pero generalmente las larvas pupan en el suelo y emergen los adultos para iniciar un nuevo ciclo.

Control: El control integrado que incluye monitoreo, manejo cultural (como rotación de cultivos y fechas de siembra) y, en casos necesarios, el uso de insecticidas, entre ellos: clorpirifos, lambda-cihalotrina + tiametoxam, deltametrina, y metomilo. Fundamentales para minimizar el impacto de esta plaga (FAO, 2013).



Fuente: Reyes, 2015.

**Figura 7.** Ovipostura de hembras en grano de sorgo en formación de sorgo.

### 3.4.2 Gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*)

Es un lepidóptero de la familia Noctuidae, que se caracteriza por su alta capacidad de migración, resistencia a insecticidas y amplio rango de hospederos. La hembra adulta deposita masas de huevos en las hojas de las plantas hospedantes. Las larvas pasan por seis estadios larvales y su ciclo completo puede durar entre 30 y 60 días, dependiendo de la temperatura y otros factores ambientales (Sparks, 1979).

El daño más característico ocurre cuando las larvas perforan hojas nuevas, generando perforaciones alineadas y excrementos visibles. En infestaciones severas, pueden destruir completamente el cogollo, afectando el desarrollo de la planta y reduciendo significativamente el rendimiento del cultivo.

Control: El control biológico es una herramienta clave dentro del manejo integrado de *Spodoptera frugiperda*, especialmente por su bajo impacto ambiental y su capacidad de sostener el control a largo plazo. Existen tres enfoques principales: control por parasitoides, depredadores y entomopatógenos (Cave, 2000).



Fuente: Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Nayarit, 2015.

**Figura 8.** Larvas alimentándose de las cariósides del sorgo.

### 3.4.3 Gusano soldado (*Spodoptera exigua*)

Los adultos son palomillas que conservan hábitos nocturnos migratorios y gregarios, son atraídos vigorosamente por la luz, sabor dulce y la fruta en desintegración, se localizan cómodamente durante las noches volando cerca de las lámparas eléctricas. Mientras que las larvas se presentan de tono verde claro con la cabeza más oscura, las cuales se localizan en grupos (Capinera, 2001).

Las larvas causan el daño en el follaje al morder los frutos. En algunas plantas las larvas defolian las plantas al alimentarse del follaje alimentándose por la noche y ocultándose bajo restos de cultivo durante el día.

Control: Se pueden identificar diversos enemigos naturales para esta plaga como lo son: Parasitoide Avispa (*Trichogramma pretiosum*) que actúa sobre los huevecillos, Entomopatógenos: *Bacillus thuriemgeusis* eficaz en el control de larvas y *Beauveria bassiana* para el control de pupas. Estos agentes biológicos son altamente efectivos para disminuir las poblaciones de esta plaga (Zhang *et al.*, 2015).



Fuente: Bautista-Martínez, 2006.

**Figura 9.** Larva de *Spodoptera exigua*.

#### 3.4.4 Pulgón amarillo del sorgo (*Melanaphis sacchari*)

Es un áfido de color amarillo pálido a crema, con cornículos oscuros. Se reproduce principalmente por partenogénesis, lo que permite un crecimiento poblacional explosivo bajo condiciones favorables. Se reproduce sin necesidad de machos, cada hembra puede producir hasta 70 crías vivas completando así su ciclo de vida entre los 7 y 10 días a temperaturas cálidas (Singh y Agarwal, 2004).

Las ninfas y adultos se alimentan en colonias sobre el envés de las hojas, succionando la savia de los tejidos vasculares. Provocando amarillamiento, marchitez progresiva y, en infestaciones severas, muerte de hojas y plantas jóvenes. La succión constante reduce la capacidad fotosintética y debilita el desarrollo de la planta. El pulgón secreta melaza que cubre hojas, tallos y panojas. Esta melaza favorece el crecimiento de hongos saprófitos, especialmente fumagina (*Capnodium* spp.), que bloquea la fotosíntesis.

Control: El manejo del pulgón amarillo debe ser integrado, combinando prácticas culturales, biológicas, químicas y el monitoreo constante del cultivo. Dada su alta capacidad reproductiva y dispersión, es clave actuar de manera preventiva y oportuna. Aplicar solo cuando se superen los umbrales económicos y se justifique económicamente insecticidas recomendados como: Sulfoxaflor, flonicamid, imidacloprid, acetamiprid (Brewer *et al.*, 2017).



Fuente: INTAGRI, 2015.

**Figura 10.** Aspecto general del pulgón amarillo del sorgo.

### 3.4.5 Barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis*)

Pertenece al orden Lepidoptera y a la familia Crambidae. Su ciclo de vida y comportamiento lo hacen especialmente dañino, ya que sus larvas se alimentan internamente del tallo, lo que reduce la productividad y puede facilitar el ingreso de patógenos. La duración del ciclo varía según condiciones climáticas, pero puede completarse en 30-40 días en condiciones favorables. Las larvas al emerger, penetran el tallo y se alimentan internamente, causando galerías (Santos *et al.*, 2016).

Las larvas perforan el tallo del sorgo para alimentarse, generando galerías internas que interrumpen el transporte de nutrientes y agua. Esto provoca debilitamiento de la planta, deformación del tallo y en casos severos el volcamiento o quiebre de la planta, lo que dificulta la cosecha mecánica. La alimentación interna reduce la capacidad fotosintética y afecta el llenado del grano.

Control: El control biológico es una de las estrategias más sostenibles y efectivas para manejar *Diatraea saccharalis*. Entre los agentes de control destacan parasitoides como *Cotesia flavipes* y *Cotesia sesamiae*, que atacan las larvas del barrenador dentro del tallo. El control químico puede ser efectivo, especialmente en fases tempranas utilizando insecticidas organofosforados, piretroides y neonicotinoides (Valle *et al.*, 2012).



Fuente: Agro productores, 2018.

**Figura 11.** Larva de *Diatraea saccharalis*.

### 3.5 Principales enfermedades

#### 3.5.1 Roya del sorgo (*Puccinia sorghi*)

Enfermedad fúngica causada por *Puccinia purpurea*, que afecta principalmente al cultivo de sorgo. Esta enfermedad es importante debido a las pérdidas que puede generar en rendimiento y calidad de los cultivos, especialmente en regiones tropicales y subtropicales.

Los síntomas se presentan con la aparición de pústulas pequeñas y redondeadas de color naranja a rojizo en las hojas. Las lesiones se desarrollan en ambas caras de la hoja, causando necrosis y debilitamiento del tejido foliar. La roya reduce el área foliar funcional, lo que impacta la fotosíntesis y el desarrollo del cultivo. Puede causar pérdidas de rendimiento de hasta un 30% en casos severos, dependiendo de la susceptibilidad de la variedad y las condiciones ambientales (Burkhardt Hunjan, 1989).

Control: Uso de variedades resistentes es la estrategia más eficaz. Prácticas culturales como rotación y manejo adecuado de residuos. Aplicación de fungicidas en casos de alta presión de la enfermedad como: propiconazol, difenconazol o hexaconazol, aplicados en pulverizaciones cada 15 días después de la aparición de los síntomas (Silva *et al.*, 2014).



Fuente: INTAGRI, 2015.

**Figura 12.** Roya. A. Ataque en hojas y tallo. B. Uredinios en hoja. C. Urediniosporas de *Puccinia purpurea*.

### 3.5.2 Tizón de la panoja (*Fusarium moniliforme*)

Enfermedad fúngica causada por *Claviceps africana* (y otras especies como *Claviceps sorghi*) que afecta la floración del sorgo. El hongo infecta los óvulos en las flores abiertas, reemplazando el grano en formación por una masa gelatinosa de esporas que exuda un líquido azucarado (mielada) altamente infeccioso.

Los síntomas se presentan como; secreción de un líquido dulce y pegajoso (mielada) de color amarillento o marrón claro que emerge de las glumas de la panoja, la formación de esclerocios (estructuras negras y duras) que reemplazan al grano. Considerando que la enfermedad es más severa cuando hay condiciones húmedas al momento de floración (Bandyopadhyay *et al.*, 1998).

Control: Uso de variedades resistentes o con floración corta y sincrónica. Evitar siembras tardías que coincidan con condiciones húmedas durante la floración. Aplicación de fungicidas protectantes (como propiconazol) puede reducir la infección, pero no es rentable a gran escala para grano comercial. Es más común en la producción de semilla certificada (Ngugi *et al.*, 2002).



Fuente: Panorama agro, 2015.

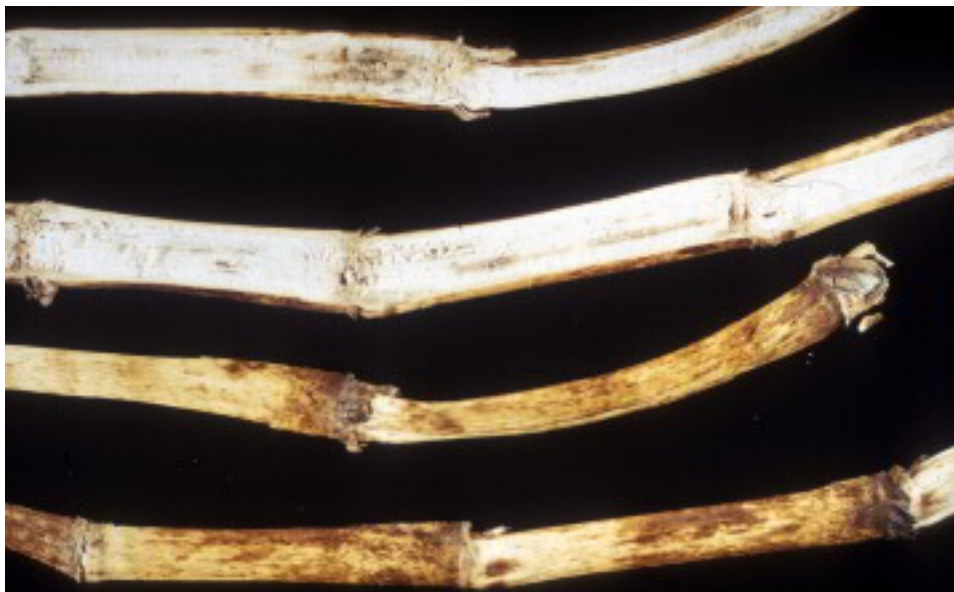
**Figura 13.** Panoja de sorgo con mielecilla, síntoma de la enfermedad en su forma asexual.

### 3.5.3 Antracnosis (*Colletotrichum graminicola*)

La antracnosis del sorgo es una enfermedad fúngica causada por el hongo *Colletotrichum sublineolum*, que puede afectar hojas, tallos, vainas y panojas del sorgo (*Sorghum bicolor*), provocando pérdidas importantes en rendimiento, especialmente en climas cálidos y húmedos.

Los síntomas en hojas se presentan como; lesiones circulares o elípticas de color rojo oscuro, marrón o púrpura con márgenes bien definidos y centros más claros. En tallos y vainas como; manchas necróticas, a veces hundidas, que pueden provocar debilitamiento estructural. Y en panojas y semillas como; desecación parcial, manchas oscuras y baja viabilidad de grano (Ngugi *et al.*, 2000).

Control: La aplicación de fungicidas sistémicos (ej. estrobilurinas como azoxystrobin o triazoles como propiconazol) puede ser efectiva, especialmente en producción de semilla. La aplicación de fungicidas en combinación con el uso de variedades resistentes mejora significativamente el manejo de la antracnosis en sorgo (Prom *et al.*, 2012).



Fuente: Panorama agro, 2015.

**Figura 14.** Pudrición por antracnosis en tallo.

### 3.5.4 Mancha foliar zonada (*Gloeocercospora sorghi*)

Hongo fitopatógeno que afecta principalmente las hojas del sorgo, aunque también puede presentarse en tallos y otras partes verdes de la planta. Es más común en regiones tropicales y subtropicales, con alta humedad relativa y temperaturas cálidas.

Los síntomas particulares se presentan como lesiones circulares o elípticas, de 2 a 12 mm de diámetro, con zonas concéntricas visibles, similares a un ojo de rana. Coloración de las lesiones: marrón o pardo con anillos de diferentes tonos, a menudo rodeados por un halo clorótico y en infecciones severas, puede producir defoliación prematura (Thakur *et al.*, 2007).

Control: El método más eficiente es el uso de variedades resistentes, la implementación de prácticas culturales como; rotación de cultivos, eliminación de residuos infectados, evitar siembras densas y favorecer la aireación del follaje. El uso de fungicidas como azoxystrobin, trifloxystrobin, o mezclas con triazoles pueden usarse, principalmente en producción de semilla o en cultivos de alto valor (Prom *et al.*, 2011).



Fuente: Universidad de Georgia, 2017.

**Figura 15.** Síntoma de la mancha foliar zonada en muestras de campo de sorgo.

### 3.5.5 Mildiu veloso (*Peronosclerospora sorghi*)

*Peronosclerospora sorghi* es un oomiceto que afecta principalmente sorgo y maíz. Puede causar infección sistémica (desde semilla o suelo) o localizada (por conidios en hojas). En la infección sistémica (plántulas), se observan bandas cloróticas en hojas jóvenes y enanismo, incluso muerte prematura. En infección localizada aparecen lesiones necróticas rectangulares, seguidas de una pelusilla blanca algodonosa (esporangios) en el envés de las hojas.

Sobrevive como oospora en restos de cultivo o en el suelo. La infección puede ocurrir sistémicamente (desde la semilla o suelo) o localmente por conidios. Los síntomas más comunes incluyen: rayas cloróticas longitudinales en las hojas, crecimiento atrofiado y esterilidad de las espigas, exudado veloso o algodonoso gris blanquecino en el envés de las hojas y la muerte de plántulas en casos severos. (Frederiksen y Renfro, 1977).

Control: Se recomienda el uso de variedades resistentes como medida más eficaz. En el control químico el tratamiento de semillas con metalaxil o mefenoxam las aplicaciones foliares con fosetil-AI, mancozeb, azoxystrobin también pueden ser útiles. La rotación de cultivos, eliminación de residuos y labranza profunda reducen la acumulación de oosporas (Thakur *et al.*, 2003).



Fuente: Agronomic Spotlight, 2012.

**Figura 16.** Hoja de sorgo infectada con mildiu veloso.

### 3.6 Usos del sorgo

El sorgo, en sus distintas variedades, se emplea tanto en la alimentación humana ya sea como alimento directo o en la preparación de bebidas alcohólicas como en la nutrición animal, especialmente en la elaboración de forrajes y piensos.

Uno de los principales destinos del sorgo es la nutrición animal. Además de ser una opción económica para los productores ganaderos, ofrece ventajas para la salud del ganado debido a su bajo contenido de taninos y micotoxinas. Los taninos, en general, se consideran perjudiciales porque pueden dificultar la digestión y limitar la absorción de vitaminas y minerales. Por su parte, las micotoxinas también presentan diversos efectos negativos sobre la salud. En cuanto a su composición nutricional, el sorgo es muy parecido al maíz, aunque presenta niveles ligeramente superiores de proteína y energía, lo que lo convierte en un cultivo muy adecuado para la alimentación animal (CZ Insights, 2024).

El sorgo tiene múltiples usos en la dieta humana. Puede consumirse como grano entero, transformarse en harina o sémola, o incorporarse a productos procesados como cereales, panes, galletas y cerveza. Además, forma parte de la preparación de platos tradicionales en diversas culturas, como el *Injera* en Etiopía o el *Sorghum bicolor* en la India.

Se emplea en la elaboración de etanol como una opción sostenible frente a los combustibles fósiles. Este biocombustible renovable contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a disminuir la dependencia del petróleo. Además, favorece la diversificación de la economía agrícola y puede generar nuevas oportunidades laborales en áreas rurales.

Por último, el sorgo se emplea también como un insumo en la fabricación de bioplásticos y papel, mientras que sus residuos agrícolas han sido investigados como fuente de fibra para elaborar materiales compuestos biodegradables. Esta diversidad de usos resalta el valor del sorgo como un cultivo multifuncional con aplicaciones en distintos ámbitos de la economía rural y la bioindustria (Cortez *et al.*, 2022).

### 3.7 Valor agregado

Para suministrar carne y leche de calidad, en los países desarrollados se suelen utilizar dos tipos de alimentación del ganado (como el forraje y el ensilado). Sin embargo, debido al clima, hay escasez de pasturas durante varios meses del año y, por lo tanto, el ensilado para la alimentación del ganado es el estilo principal durante este período de tiempo.

En comparación con el maíz, el sorgo dulce posee algunas propiedades excelentes, entre ellas una alta tolerancia a suelos pobres y ácidos, una alta eficiencia en el uso del agua, un bajo requerimiento de nutrientes y una alta producción de biomasa. Por lo tanto, ensilar sorgo dulce como forraje es un candidato potencial para la alimentación de rumiantes. De manera que el ensilado de sorgo dulce mostró una mejor calidad de fermentación, estabilidad aeróbica y valor nutricional (Mol Plant, 2019).

El jugo de sorgo dulce, rico en azúcar, y las partes lignocelulósicas insolubles del bagazo de sorgo dulce son materias primas potenciales para la producción bioquímica, ya sea de forma aislada o mediante cofermentación. Además, el sorgo dulce también se utiliza para producir algunos productos intermedios, que posteriormente se convierten en otros derivados, como el biobutadieno. A partir del sorgo dulce se pueden producir diversos bioquímicos industriales de valor añadido, entre ellos, principalmente biocombustibles y productos químicos finos (Wang *et al.*, 2018).

Por lo tanto, el sorgo dulce podría ser una materia prima rentable para la recuperación de productos de compuestos fenólicos (Chen *et al.*, 2021).

Se han obtenido distintos productos bioquímicos a partir de la biomasa de sorgo dulce, y se han creado tecnologías efectivas para optimizar tanto su rendimiento como su calidad. Sin embargo, todavía es necesario enfrentar el desafío de la baja competitividad económica. Considerando que la clave para lograr una solución rentable está en continuar mejorando la eficiencia económica de la biomasa de sorgo dulce.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización del sitio experimental

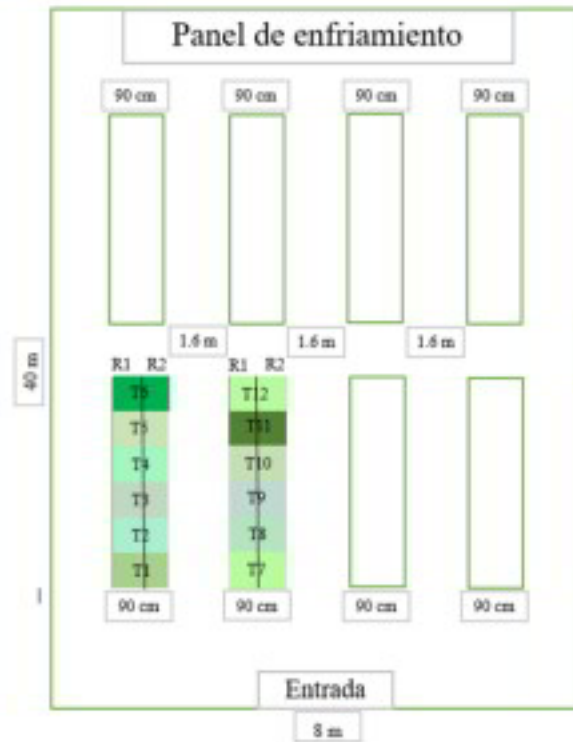
La presente investigación se llevó a cabo durante el ciclo agrícola Primavera-Verano, 2024 en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila. El experimento se desarrolló en un invernadero tipo Túnel de mediana tecnología (Figura 13) situado a una latitud de 25° 21'19.5" N, longitud de 101°01'49.7" W y a una altitud de 1,731 msnm. La temperatura promedio anual es de 18 a 22°C con un clima seco y semiseco (Google Earth, 2024).



Fuente: Gómez-Salgado (2024)

**Figura 17.** Fachada e interior del invernadero No. 5 (UAAAN).

El invernadero tiene una estructura metálica y una cobertura de fibra de vidrio, cuenta con camas de siembra con una extensión de 16 m lineales, 90 cm de ancho, 50 cm de altura y con panel de enfriamiento, el cual mantiene una temperatura en promedio de 21 °C ver (Figura 17).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

**Figura 18.** Distribución de los tratamientos en las camas del invernadero No. 5.

En el Cuadro 2 se muestran las características de las parcelas en invernadero.

**Cuadro 2.** Características del ensayo y parcela experimental.

Localidad	Buenavista, Saltillo.
Diseño estadístico	Completamente al azar
Número de genotipos	12
Número de repeticiones	2
Fecha de siembra	27 de enero de 2024
Régimen hídrico	Riego manual/cintilla
Número de plantas por genotipo	6
Número de hileras por cama	2
Distancia entre plantas	30 cm
Distancia entre hileras	30 cm
Longitud de la cama	16 m
Fertilización	Química y orgánica*

\*Humus líquido de lombriz (Orgánico), Ácidos húmicos y fúlvicos (Fertihumus 12%)®, Fertilizante inorgánico enraizador (Magic Root)®, Fertilizante granulado (Fertidrip 20-20-20)®, Fertiplus (7-18-14 + Micronutrientes)®, Agromil Plus®.

### 3.2 Germoplasma utilizado

El material utilizado consistió de 12 genotipos de sorgo (Cuadro 3) los cuales pertenecen al Programa de Producción de Granos y Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

**Cuadro 3.** Líneas experimentales de sorgo evaluadas en el Campo Experimental de la UAAAN ciclo P-V. 2024.

Número de identificación	Línea experimental	Color de grano
1	UA-01	Negro
2	UA-02	Blanco
3	UA-03	Rojo
4	TX-435 R	Rojo
5	TX-430 R	Rojo
6	TX-278 R	Rojo
7	162 R	Rojo
8	154 R	Rojo
9	151 R	Rojo
10	150 R	Rojo
11	10351	Blanco
12	LES 291	Rojo

### **3.3 Manejo agronómico del cultivo**

#### **3.3.1 Preparación del terreno**

Se inició la preparación del terreno, removiendo los residuos del cultivo anterior establecido en la cama así mismo malezas y piedras y materiales que interfirieran en el establecimiento del cultivo, continuando así con una labranza manual con ayuda de azadón aflojando el suelo para una mejor aireación. Posteriormente, el terreno fue nivelado con ayuda de un rastrillo para evitar encharcamientos. Se utilizó cinta métrica y estacas para delimitar los tratamientos y sus respectivas repeticiones.

#### **3.3.2 Siembra**

La siembra se realizó manualmente el día sábado 27 de enero de 2024, colocando las semillas a una profundidad aproximada de tres veces su tamaño, cubriéndolas con tierra sin compactarla. Posteriormente, se instaló un sistema de riego por goteo con cintilla y se realizó el primer riego.

Se inició el control de malezas de forma manual aproximadamente a los 15 días después de la siembra, cuando las malezas emergentes comenzaron a competir con el cultivo por luz, agua y nutrientes. Durante esta actividad se eliminaron principalmente malezas de hoja ancha, presentes en las camas de cultivo y en los pasillos.

#### **3.3.4 Fertilización**

Un mes después de la siembra se aplicó la primera fertilización con Fertidrip® 20-20-20 de micronutrientes con mochilas aspersoras para una aplicación foliar. Posteriormente se aplicó Fertiplus® 7-18-14 + Micronutrientes para ayudar a mejorar el desarrollo de hojas y el enraizamiento de la planta. De 2 a 3 veces por semana se aplicó fertilizante foliar a base de ácidos húmicos y fúlvicos, enraizador (Magic Root®) y humus de lombriz, durante toda la etapa vegetativa, reproductiva y hasta el llenado de grano.

### **3.3.5 Control de malezas**

El manejo de malezas se realizó manualmente, haciendo uso de herramientas sencillas como azadones o mediante la extracción directa de las plantas indeseadas con las manos. Esta actividad se realizó en las áreas entre hileras y en torno a las plantas del cultivo, poniendo especial atención en no afectar sus raíces. El propósito principal fue remover las malezas en sus fases iniciales de crecimiento, con el fin de disminuir la competencia por recursos esenciales como agua, nutrientes, luz y espacio.

### **3.3.6 Manejo de plagas y enfermedades**

Se realizó un control químico contra la araña roja, a través de la aplicación del acaricida Dimetri 400, cuyo componente activo es dimetoato al 40%. Este producto tiene acción por contacto y por ingestión, interfiriendo en el sistema nervioso y brindando un control efectivo sobre las fases móviles de la plaga. Se realizó al detectarse un nivel de infestación durante las primeras fases del desarrollo vegetativo del cultivo. Se empleó un equipo de aspersion manual procurando una cobertura homogénea del follaje, con especial atención en la parte inferior de las hojas, que es donde la plaga suele establecerse.

### **3.3.7 Cosecha**

La cosecha se llevó a cabo de manera manual el 21 de agosto del 2024 cuando el grano ya había alcanzado su madurez fisiológica. Procediendo así al corte de las panículas más representativas de cada línea experimental utilizando una hoz. Posteriormente, las muestras fueron debidamente etiquetadas de acuerdo con su genotipo y el bloque experimental al que pertenecían. Finalmente, se trasladaron a la bodega para su correspondiente proceso de trilla.

### **3.3.8 Trilla**

Se llevó a cabo el 9 de noviembre del 2024. Es el proceso mediante el cual se separan los granos maduros de las panojas (inflorescencias) después de la cosecha.

### **3.4 Variables evaluadas**

Se seleccionaron cinco plantas al azar en condiciones de competencia completa, las cuales fueron consideradas como las más representativas de su línea experimental, con el fin de evaluar y analizar las siguientes variables:

#### **3.4.1 Altura de la planta (AP)**

Al alcanzar la planta su madurez fisiológica del grano y con la ayuda de una cinta métrica, se midió desde la base del tallo hasta la punta de la panícula. Teniendo así el resultado promedio expresado en centímetros.

#### **3.4.2 Longitud de panícula (LP)**

Esta variable fue cuantificada utilizando una regla de 30 centímetros, midiendo la distancia desde la inserción de la primera rama primaria hasta el ápice de la panícula. Los resultados se expresaron en centímetros (cm).

#### **3.4.3 Longitud de excursión (LE)**

Ubicamos la panícula totalmente emergida, asegurándonos que la panícula esté completamente expuesta, después se midió la distancia desde el punto de inserción de la hoja bandera hasta la base de la panícula, siguiendo el eje del tallo. Expresando el resultado promedio obtenido en centímetros.

#### **3.4.4 Diámetro del tallo (DT)**

Con la ayuda de un calibrador vernier digital, se llevó a cabo la evaluación en el entrenudo localizado inmediatamente por encima de la tercera hoja contada desde el ápice de la planta, excluyendo la hoja bandera o panicular.

#### **3.4.5 Longitud de hoja (LH)**

Se ubicó la lígula de una hoja central de la planta y con ayuda de una cinta métrica medimos la distancia de la lígula hasta la punta o terminación de la hoja. El resultado fue expresado en cm.

#### **3.4.6 Ancho de hoja (AH)**

De la misma hoja donde se obtuvo la variable de longitud, ubicamos la parte intermedia o aquella parte donde la hoja se encuentre más ancha y con ayuda de una regla tomamos la medición, obteniendo el resultado en cm.

#### **3.4.7 Días a floración (DF)**

Se registró la fecha en la que el 50% de las plantas de cada población presentó floración (emergencia de panículas), y se determinaron los días hasta la floración tomando como referencia la fecha de siembra.

#### **3.4.8 Sólidos solubles totales (SST)**

Se le retiró al tallo tanto las hojas como la panícula, dejando el tallo libre y dividiéndolo en tres secciones (parte superior, parte intermedia y parte basal). A cada sección se le extrajo líquido utilizando unas pinzas, para después colocar unas gotas en un refractómetro digital, y leer la escala donde una línea de demarcación indique el porcentaje de sólidos solubles. Los resultados se obtuvieron como un porcentaje en peso (% p/p), lo que significa que cada grado Brix equivale a 1 gramo de sólidos disueltos en 100 gramos de solución.

#### **3.4.9 Rendimiento de grano por planta (RTO)**

Posteriormente de la trilla, con apoyo de una balanza analítica se determinó el peso total de la muestra de cada genotipo y se dividió entre el número de panículas trilladas para estimar el rendimiento de grano en gramos por planta. El resultado se expresó en gramos por planta ( $\text{g planta}^{-1}$ ).

#### **3.4.10 Enfermedades foliares (EF)**

Se valoró de manera visual las plantas según la incidencia de la enfermedad que presentaran, tomando en cuenta una escala de 1 a 5. Donde 1 es completamente sana, 2 de 1 a 10% de daño, 3 de 11 a 25% de daño, 4 de 26 a 40% de daño y de 5 a más del 41% de daño.

### 3.5 Análisis estadísticos

#### 3.5.1 Análisis univariado

Las diferencias estadísticas entre los tratamientos se analizaron utilizando el análisis de varianza completamente al azar y la comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) utilizando el paquete estadístico Minitab 16.

El modelo es:  $Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij}$

Donde:

$Y_{ij}$  = observación del i-ésimo tratamientos en la j-ésima repetición.

$\mu$  = media general de la variable.

$T_i$  = efecto del i-ésimo tratamiento.

$E_{ij}$  = efecto del error experimental.

$i = 1, 2 \dots t$  (tratamiento).

$J = 1, 2 \dots r$  (repeticiones).

#### Prueba de Tukey

Se realizó para comparar las medias de los seis tratamientos evaluados, utilizando la probabilidad de error  $\alpha = 0.05$ .

$DMSH = q(\alpha, T, gl \text{ error}) S\check{X}$

Dónde:  $q(\alpha, T, gl \text{ error})$  = al valor tabular de Tukey que se localiza en tablas, con número de tratamientos  $T$ , los grados de libertad del error y nivel de significancia  $\alpha$ .

$S\check{X}$  = error estándar de la media =  $\sqrt{CM_{\text{error}}/r}$

CM error = cuadro medio del error;  $r$  = repeticiones.

El coeficiente de variación se estimó para cada una de las variables analizadas, en donde se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{C. V. (\%)} = \frac{\sqrt{\text{CMEE}}}{\bar{x}} \times 100$$

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación

CMEE = Cuadrado medio del error experimental

X = Media general de tratamientos

100 = Constante para expresar el C.V. en porcentaje

### **3.5.2 Análisis multivariado**

#### **Análisis de Componentes Principales (ACP)**

Utiliza una matriz X de orden (n x p), de np observaciones correspondientes a los valores de p variables de cada una de n unidades de estudio (genotipo) y consiste en transformar un conjunto de variables  $x_1, x_2, \dots, x_p$  a un nuevo conjunto de variables  $y_1, y_2, \dots, y_p$ . Estas nuevas variables deben tener las siguientes propiedades (Johnson, 2000):

1. Es una combinación lineal de las x's. Por ejemplo, para el primer componente.  $Y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p = a'_{1x}$ . Donde  $x = [x_1 \ x_2 \dots \ x_p]$  es el vector de valores muestrales de las variables originales, y  $a_{ij}$  es el valor del j-ésimo elemento del vector característico a 1 asociado al valor característico más grande  $\lambda_1$ .
2. En forma matricial para todos los componentes,  $Y = XA$ , en donde Y es la matriz de orden n x p de componentes principales; A es una matriz de orden p

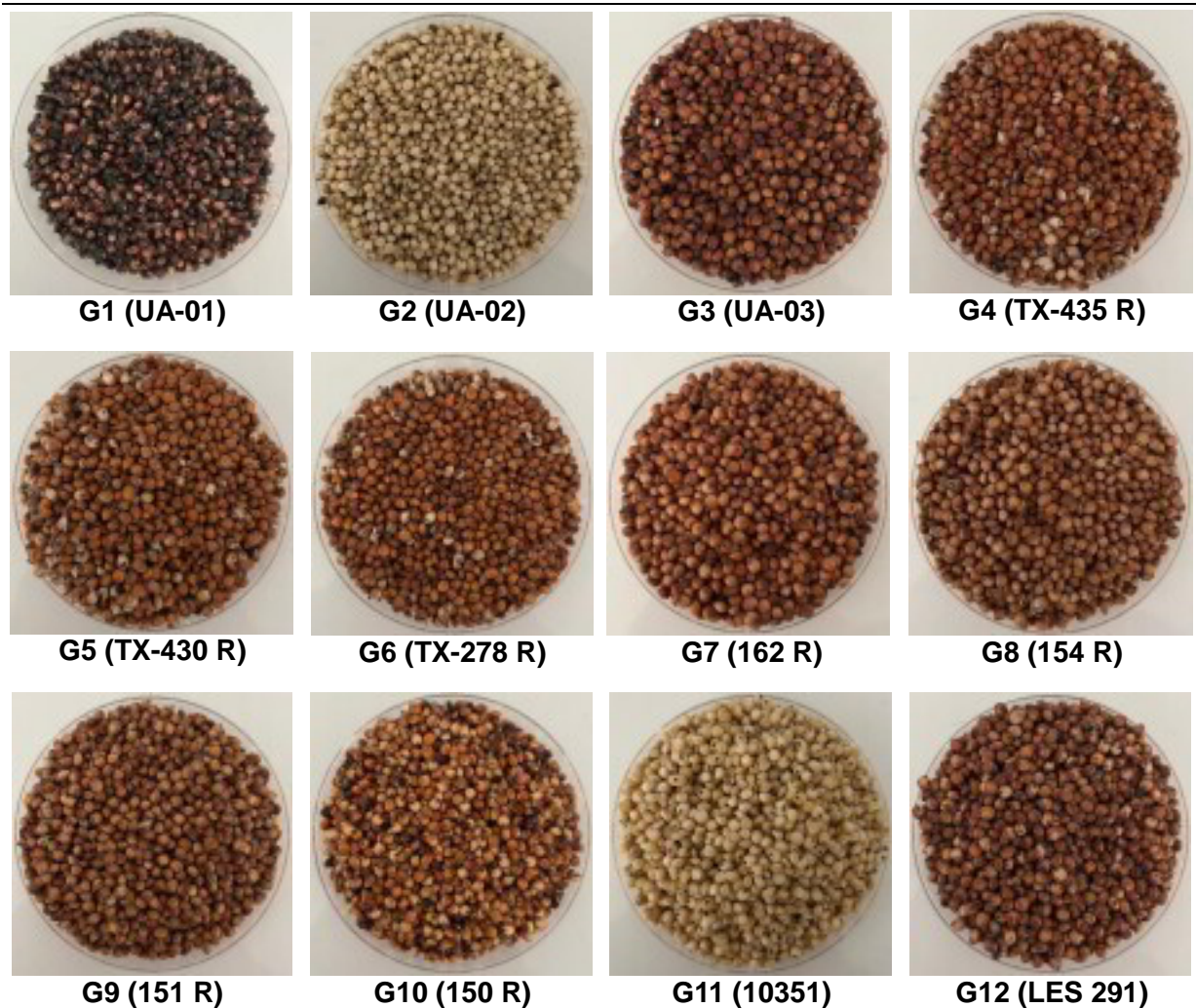
$x$   $p$  de vectores característicos y  $X$  es la matriz de orden  $n \times p$  de observaciones.

3. La suma de cuadrados de los coeficientes  $a_{ij}$  para cada  $i$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ) es la unidad.
4. De todas las posibles combinaciones,  $Y_1$  tiene la máxima varianza:  $\text{Var}(Y_1) > \text{Var}(Y_2) > \dots > \text{Var}(Y_p)$ .
5. Las  $Y$  no están correlacionadas, por lo que los componentes generados no están asociados entre sí.

Con los valores obtenidos se realizó un análisis de varianza, una prueba de comparación de medias, mediante la prueba de Tukey ( $P \geq 0.05$ ), correlaciones fenotípicas y un análisis de componentes principales utilizando el programa estadístico Minitab 16 (2009).

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 19 se presenta la característica cualitativa correspondiente al color de la testa del grano de los 12 genotipos de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) evaluados en el experimento, destacándose la predominancia del color rojo, presente en los siguientes genotipos: UA-03, TX-435 R, TX-430 R, TX-278 R, 162 R, 1154 R, 151 R, 150 R y LES 291; también se presentaron genotipos de color blanco los cuales fueron: UA-02 y 10351; Por último, el genotipo de color negro UA-01.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

**Figura 19.** Color de la testa del grano de los 12 genotipos de sorgo.

El color del grano de sorgo presenta una amplia variabilidad, que va desde tonos blancos hasta rojo y negro, y su relevancia radica en que refleja su composición química y determina su potencial de uso. Los granos claros, como los blancos y amarillos, son preferidos en la industria alimentaria para la elaboración de harina y productos de consumo humano. En cambio, los granos más oscuros, como los rojos o bronce, suelen contener mayores niveles de antioxidantes, taninos u otros compuestos bioactivos, lo que los hace adecuados tanto para alimentación animal como para la producción de biocombustibles.

Diversos factores afectan el color que presenta el grano de sorgo al ser observado. Entre ellos se incluyen la genética relacionada con el color del pericarpio, el grosor de este, la existencia o no de la testa, el color y grosor de la testa cuando está presente, así como también el color del endospermo inclusive pueden indicar presencia o ausencia de algunos genes, además de la presencia de taninos en la testa (Rooney y Miller, 1981).

El sorgo rojo tiene una estrategia natural para reducir el daño causado por aves: su color intenso funciona como un factor de disuasión visual. Muchas aves evitan granos de color rojo porque lo asocian con madurez tardía, sabor amargo o toxicidad a consecuencia de la presencia de taninos que son compuestos fenólicos presentes en el pericarpio de los granos rojos que hacen que los granos sean menos aceptables para aves y algunos insectos. En otras palabras, el color rojo hace que los granos sean menos atractivos para ellas, reduciendo el riesgo de que sean consumidos antes de la cosecha.

Los taninos, son compuestos que afectan negativamente el valor nutritivo del sorgo, pues fijan las proteínas del grano reduciendo su disponibilidad y, asimismo, inhiben la acción de la amilasa (enzima importante durante el proceso de digestión de los granos), causando una disminución del 10 al 30% y más en la eficiencia alimentaria, en comparación con los sorgos que no poseen estos compuestos. En algunos granos, existe suficiente cantidad de taninos condensados como para precipitar, o fijar, más proteína de la existente en los mismos (Chessa *et al.*, 2011).

#### 4.1 Análisis de varianza

El análisis de varianza completamente al azar, detecto para las variables cuantitativas medidas en 12 genotipos de sorgo (Cuadro 4) evidenció diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre genotipos en la variable AH, así como diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en las variables DF, AP, LP, LE, DT, LH, EF y REND. Estos hallazgos indican la existencia de una considerable variabilidad genética en el germoplasma analizado. En general, las variables mostraron coeficientes de variación bajos (C.V.= 1.17–11.62%), a excepción de la variable LE, que presentó un valor más elevado (C.V.= 29.92%). Esto sugiere que los datos obtenidos son lo suficientemente consistentes como para respaldar decisiones confiables.

**Cuadro 4.** Cuadrados medios y coeficientes de variación de las variables agronómicas de 12 genotipos de sorgo en el ciclo P-V 2024.

FV	GL	Cuadrados medios								
		DF	AP	LP	LE	DT	LH	AH	EF	REND
Gen	11	123.4**	1865.5**	56.45**	127.7**	28.12**	115.8**	2.50*	0.23**	0.04**
EE	12	5.83	93.6	3.85	24.8	7.10	27.4	0.73	0.41	0.00001
Total	23									
CV (%)		3.00	7.35	6.83	29.92	10.54	7.05	11.62	9.74	1.17
$\bar{X}$		80.41	131.51	28.69	16.64	25.27	74.18	7.35	2.83	0.27

\*Significativo al 0.05, \*\*Altamente significativo al 0.01 de probabilidad; DF= días a floración, AP= altura de planta, LP= longitud de panícula, LE= longitud de excersión, DT= diámetro del tallo, LH= longitud de la hoja, AH= ancho de la hoja, EF= enfermedades foliares, REND= rendimiento en gramos por planta.

#### 4.2 Prueba de medias

De acuerdo a las variables agronómicas evaluadas en la comparación de medias de la prueba de Tukey 0.05, se obtuvieron diferencias significativas entre genotipos. Para la variable REND el genotipo 2 ( $0.614 \text{ g pl}^{-1}$ ) estadísticamente obtuvo el más alto rendimiento ( $p \leq 0.05$ ) superando también al obtenido por González (2011) que fue de  $0.500 \text{ g pl}^{-1}$  además presento un buen índice de sanidad (1) y ancho de hoja (8.2 cm). En cuanto al índice de excersión se presentó un valor LE= 0.1 cm, varios autores indican que una buena longitud de excersión se encuentra entre los parámetros de 5 a 10 cm, sin embargo, Montes García *et al* (2013) menciona que una longitud moderada es de 4cm, a su vez incluye en su investigación de híbridos de compañías americanas con altos rendimientos y valores de excersión de 0.0 cm.

**Cuadro 5.** Análisis comparativo de las medias para las variables agronómicas de 12 genotipos de sorgo, organizados en función a la variable de rendimiento.

<b>Gen</b>	<b>DF</b> días	<b>AP</b> cm	<b>LP</b> cm	<b>LE</b> cm	<b>DT</b> cm
G2	79 bcd	142.4 bc	23.6 de	0.1 c	21.2 ab
G3	84 abc	152.8 b	37.0 a	9.7 abc	26.8 a
G12	61 e	102.8 d	32.5ab	5.2 bc	27.7 a
G5	77 cd	110.5 cd	23.0de	17.4 abc	25.5 ab
G11	93 a	213.3 a	31.6 abc	16.6 abc	15.4 b
G1	74 d	139.1 bcd	29.1 bcd	23.7 ab	26.7 a
G4	82 bcd	104.6 cd	21.1 e	24.8 ab	24.7ab
G6	81 bcd	116.9 bcd	24.0 cde	18.5 abc	28.0a
G10	87 ab	116.5 bcd	29.4 abcd	19.2abc	28.0a
G8	83 bcd	126.5 bcd	35.1 ab	25.6 a	29.0 a
G7	79 bcd	140.8 bcd	24.3 cde	23.1 ab	24.3 ab
G9	85 abc	111.4 cd	33.2 ab	15.3 abc	25.6 ab
Tukey 0.05	9.59	38.44	7.79	19.79	10.58

<b>Gen</b>	<b>LH</b> cm	<b>AH</b> cm	<b>EF</b> 1-5	<b>REND</b> g pl <sup>-1</sup>
G2	77.8 abc	8.2 ab	1.0 c	0.614 a
G3	86.6 ab	9.8 a	1.0 c	0.523 b
G12	72.8 abc	8.6 ab	1.0 c	0.316 c
G5	78.2 abc	6.4 ab	5.0 a	0.239 d
G11	71.7 abc	7.4 ab	1.0 c	0.235 d
G1	65.0 c	6.9 ab	3.0 b	0.231 d
G4	67.3 bc	6.0 b	5.0 a	0.206 e
G6	74.6 abc	6.6 ab	5.0 a	0.187 f
G10	68.8 abc	6.8 ab	1.0 c	0.185 f
G8	88.8 a	7.2 ab	3.0 b	0.183 fg
G7	66.0 bc	6.1 b	5.0 a	0.168 gh
G9	72.0 abc	7.7 ab	3.0 b	0.155 h
Tukey 0.05	20.80	3.39	2.54	0.012

DF= días a floración, AP= altura de planta, LP= longitud de panícula, LE= longitud de excursión, DT= diámetro del tallo, LH= longitud de la hoja, AH= ancho de la hoja, EF= enfermedades foliares, REND= rendimiento en gramos por planta. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey 0.05).

Otro material sobresaliente y con alto rendimiento (0.523 g pl<sup>-1</sup>) fue el genotipo 3 con valores estadísticamente superiores ( $p \leq 0.05$ ) en las variables; LP=37.0 cm, DT= 26.8 cm y AH= 9.8 cm. Además, este genotipo mostro un valor adecuado de LE=9.7 que según lo indicado en los artículos es el ideal. Los genotipos 5, 4, 6 y 7 presentaron estadísticamente ( $p \leq 0.05$ ) los más altos promedios en el índice de enfermedad (EF=5), además de un bajo promedio en el ancho de la hoja (AH= 6.0 cm). Finalmente, se pudo observar que el genotipo 9 presento el rendimiento más inferior (0.155 g pl<sup>-1</sup>) en cuanto a los demás evaluados.

### 4.3 Análisis de varianza (SST)

De acuerdo a la variable de SST que indica la importancia del potencial nutricional del sorgo para forraje de los primeros cinco genotipos, se evaluó el contenido en la parte basal (PB), intermedia (PI) y superior (PS). Los análisis de varianza (Cuadro 6) mostraron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) para la parte basal de la planta (PB), significativas ( $p \leq 0.05$ ) en la parte superior (PS). Mientras en la parte intermedia que funciona como un conductor de nutrientes, no se presentaron diferencias significativas entre los cinco genotipos. Para los coeficientes de variación se mantuvo una tendencia baja con valores de CV de 7.55 a 11.95%.

**Cuadro 6.** Cuadrados medios y coeficientes de variación de la variable Sólidos Solubles Totales de los primeros 5 genotipos de sorgo en el ciclo P-V 2024.

FV	GL	Cuadrados medios		
		PB	PI	PS
Gen	4	10.58**	1.796	2.048*
EE	5	1.07	0.621	0.320
Total	9			
CV (%)		11.95	10.86	7.55
$\bar{X}$		8.655	7.252	7.490

\*Significativo al 0.05, \*\*Altamente significativo al 0.01 de probabilidad; SST= sólidos solubles totales, PB= parte basal, PI= parte intermedia, PS= parte superior.

### 4.4 Prueba de medias (SST)

En la comparación de la prueba de Tukey 0.05 se observaron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para la variable SST, siendo el genotipo 4 el de mayor porcentaje de contenido en las tres partes del tallo: PB=11.58 GB, PI=8.20 GB y PS=8.96 GB. Cabe mencionar que el genotipo 2 sobresaliente en las demás variables, presenta también altos contenidos de grados Brix en su parte basal, intermedia y superior. Demostrando así sus buenas características agronómicas. Por otro lado, es importante mencionar que el alto contenido de SST concentrado en el tallo permite una mayor extracción de jugo azúcares y este se fermenta con las levaduras para la producción de bioetanol.

**Cuadro 7.** Análisis comparativo de las medias para las variables agronómicas de 12 genotipos de sorgo, organizados en función a la variable de rendimiento.

Gen	SST GB		
	PB	PI	PS
G2	9.32 ab	8.17 a	7.71 ab
G3	5.28 b	6.18 a	6.70 b
G5	9.06 ab	6.41 a	6.39 b
G1	7.95 ab	7.28 a	7.67 ab
G4	11.58 a	8.20 a	8.96 a
Tukey 0.05	4.14	3.15	2.26

Gen= genotipo, SST= sólidos solubles totales, GB= grados Brix, PB= parte basal, PI= parte intermedia, PS= parte superior.

#### 4.5 Análisis de Componentes Principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar la relación existente entre los 12 genotipos de sorgo y las variables agronómicas evaluadas. En el (Cuadro 8) se expresan los valores de varianza correspondientes a los tres primeros componentes, expresados como porcentaje de la varianza total (100%), los cuales explican en conjunto el 82.5% de dicha varianza. Al considerar únicamente los dos primeros componentes principales, se logra explicar el 66.3% de la variabilidad total de los datos, donde el primer componente (CP1) aporta el 42.1% y el segundo componente (CP2) el 24.1%.

Para identificar las variables que más influyen en la diferenciación de los genotipos, en el análisis de componentes principales (ACP) se seleccionan los vectores que muestran valores propios mayores a la unidad.

En cuanto a los vectores propios, las variables que muestran los valores absolutos más altos se destacan en negritas (Cuadro 8). En el primer componente principal (CP1) las variables de mayor importancia fueron: LE, AH, EF y REND por tener una mayor influencia en el rendimiento de grano por planta. En el segundo componente principal (CP2) las variables de mayor peso incluyen las que se desarrollaron durante la etapa vegetativa como son: DF, AP y DT.

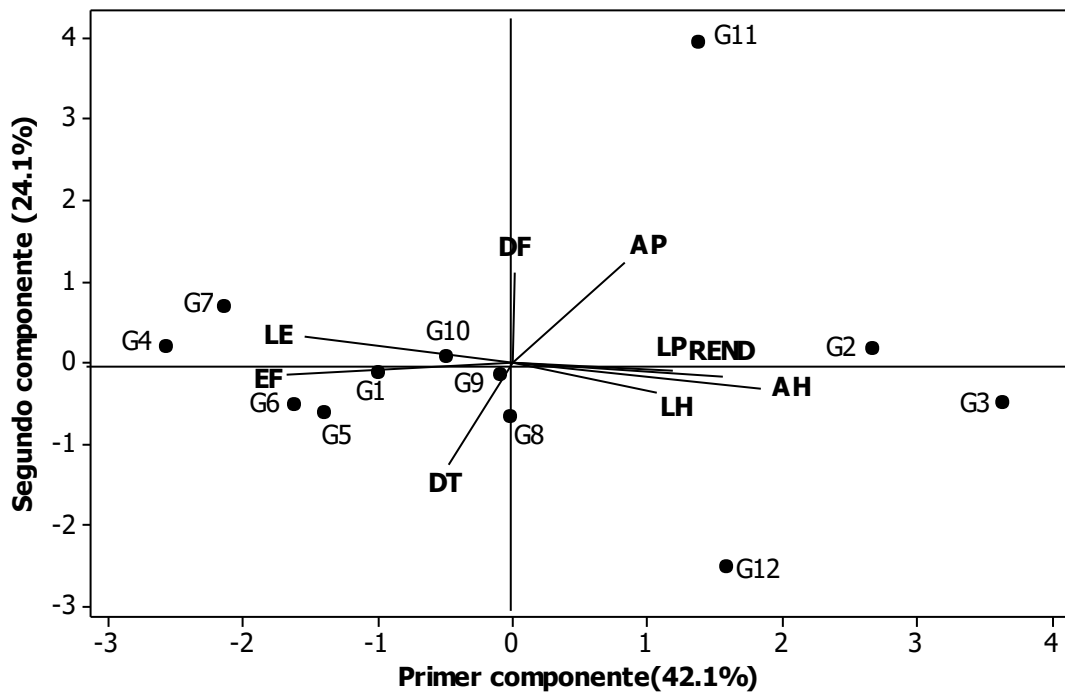
**Cuadro 8.** Valores y vectores propios para tres primeros componentes principales de 9 variables agronómicas evaluadas en 12 genotipos de sorgo en Ciclo P-V 2024 UAAAN.

	CP1	CP2	CP3
Valor propio	3.7916	2.1718	1.4630
Proporción (%)	42.1	24.1	16.3
Acumulada (%)	42.1	<b>66.3</b>	82.5
Variabes	Vectores propios		
DF	0.004	<b>0.515</b>	-0.342
AP	0.218	<b>0.567</b>	-0.045
LP	0.314	-0.051	<b>-0.578</b>
LE	<b>-0.404</b>	0.144	<b>-0.418</b>
DT	-0.123	<b>-0.574</b>	-0.326
LH	0.282	-0.165	-0.372
AH	<b>0.484</b>	-0.153	-0.077
EF	<b>-0.439</b>	-0.067	0.036
REND	<b>0.410</b>	-0.075	0.346

DF= días a floración, AP= altura de planta, LP= longitud de panícula, LE= longitud de excursión, DT= diámetro del tallo, LH= longitud de la hoja, AH= ancho de la hoja, EF= enfermedades foliares, REND= rendimiento en gramos por planta, CP= componentes principales.

En la gráfica biplot (Figura 20) se muestran los resultados del análisis de componentes principales (ACP), donde se representan los genotipos y las variables en función de los dos primeros componentes principales. Se puede observar que con los dos primeros componentes explican el 66.3% de la variación total de los datos, que, de acuerdo con Arroyo *et al.*, (2005) es suficiente para representar confiablemente la relación entre las variables y los genotipos.

En esta gráfica se observa la relación entre variables, donde el ángulo formado entre dos vectores indica el grado de correlación entre las variables correspondientes. Cuando el ángulo es pequeño (cercano a 0°), se infiere una alta correlación positiva, lo que significa que ambas variables tienden a aumentar o disminuir conjuntamente bajo las mismas condiciones experimentales. En cambio, un ángulo próximo a 180° refleja una correlación negativa, es decir, el incremento en una variable se asocia con la disminución de la otra. Por su parte, ángulos cercanos a 90° evidencian ausencia de correlación o una relación muy débil entre las variables (Abdi y Williams, 2010; Lê, Josse y Husson, 2008).



DF= días a floración, AP= altura de planta, LP= longitud de panícula, LE= longitud de excursión, DT= diámetro del tallo, LH= longitud de la hoja, AH= ancho de la hoja, EF= enfermedades foliares, REND= rendimiento en gramos por planta.

**Figura 20.** Grafica biplot de las variables-vector y dispersión de genotipos de sorgo en los dos primeros componentes principales.

En el Cuadro 9 se observa la correlación entre las variables agronómicas evaluadas. Se encontró que las variables DT y AP ( $r = -0.780^{**}$ ) están relacionadas de manera negativa y estadísticamente altamente significativa ( $p \leq 0.01$ ), por lo que se mostró que en estas líneas experimentales de sorgo se presenta una tendencia donde el aumento de la altura de planta corresponde en una disminución del diámetro del tallo, esta tendencia que se puede observar en el genotipo 11 en el Cuadro 5.

La variable AH se correlaciono altamente significativa y positiva con LP ( $r = 0.697^{**}$ ), pero negativa con LE ( $r = -0.742^{**}$ ) por lo tanto, en la mayoría de los genotipos al aumentar el AH también aumentó LP, pero disminuyó la LE.

Así mismo la variable EF presento correlaciones significativas negativa con LP ( $r = -0.627^*$ ) y positiva con LE ( $0.626^*$ ). Y altamente significativas pero negativa con AH ( $r = -0.757^{**}$ ).

Por último, se encontraron para la variable de REND correlaciones altamente significativas pero negativa para la variable LE ( $r = -0.808^{**}$ ) y positiva para AH ( $r = 0.725^{**}$ ) lo cual se traduce que las plantas con mayor rendimiento tienen una tendencia de una longitud de excersión mínima o nula, mientras que a mayor ancho de hoja se desarrolla un mayor rendimiento de grano por planta.

**Cuadro 9.** Correlaciones fenotípicas entre las variables evaluadas en 12 genotipos de sorgo Ciclo P-V 2025 UAAAN.

	DF	AP	LP	LE	DT	LH	AH	EF
AP	0.531							
LP	0.108	0.264						
LE	0.305	-0.077	-0.138					
DT	-0.429	<b>-0.780<sup>**</sup></b>	0.166	0.223				
LH	0.112	0.055	0.476	-0.269	0.208			
AH	-0.136	0.223	<b>0.697<sup>**</sup></b>	<b>-0.742<sup>**</sup></b>	-0.001	0.546		
EF	-0.059	-0.408	<b>-0.627<sup>*</sup></b>	<b>0.626<sup>*</sup></b>	0.233	-0.232	<b>-0.757<sup>**</sup></b>	
REND	-0.148	0.229	0.090	<b>-0.808<sup>**</sup></b>	-0.215	0.432	<b>0.725<sup>**</sup></b>	-0.552

\*Significativo al 0.05, \*\*Altamente significativo al 0.01 de probabilidad; DF= días a floración, AP= altura de planta, LP= longitud de panícula, LE= longitud de excersión, DT= diámetro del tallo, LH= longitud de la hoja, AH= ancho de la hoja, EF= enfermedades foliares, REND= rendimiento en gramos por planta.

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación se presentan las siguientes conclusiones:

- El germoplasma de sorgo evaluado en la característica cualitativa correspondiente de color de la testa de grano mostró una predominancia del fenotipo de color rojo (75.00%), seguido del blanco (16.66%) y una representación mínima de color negro (8.33%).
- El análisis de varianza completamente al azar, detecto diferencias significativas y altamente significativas en las variables evaluadas indicando diversidad genética entre los genotipos evaluados. Se obtuvieron además bajos coeficientes de variación (1.17 a 29.9%).
- Con respecto a la prueba de Tukey 0.05, el Gen 12 se destacó por ser el más precoz (DF=61) y por tener la menor AP=102.8 cm. En contraste, el Gen 11 mostró estadísticamente ( $p \leq 0.05$ ) un mayor número de días a floración (DF=93) y la mayor AP=213.3 cm, identificándolo como el genotipo más tardío.
- Los genotipos 3 y 8 presentaron un mejor desempeño en cuanto a la longitud de panícula y resistencia a enfermedades foliares, alcanzando longitudes superiores (LP= 37 y 35.1 cm) y niveles de incidencia de enfermedades bajos (EF= 1-3) considerados dentro del rango de sanidad.
- El rendimiento de los genotipos 2 ( $0.614 \text{ g pl}^{-1}$ ), 3 ( $0.323 \text{ g pl}^{-1}$ ) y 12 ( $0.316 \text{ g pl}^{-1}$ ) demostraron ser significativamente superiores con respecto al resto de los genotipos evaluados. Además, se caracterizaron por presentar un mayor ancho de hoja y una menor longitud de excursión, por lo que se convierten en opciones prometedoras para su evaluación en próximos ciclos de selección.

- El análisis de varianza para la variable de Sólidos Solubles Totales (SST) de los cinco primeros genotipos evaluados, mostro diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) para la parte basal (PB) y diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) para la parte superior (PS). Asimismo, se obtuvieron bajos coeficientes de variación (7.55 a 11.95%).
- En los resultados de la prueba de Tukey 0.05 para la variable de Sólidos Solubles Totales, se mostraron contenidos estadísticamente mayores en la parte basal y parte intermedia del genotipo 4 (PB= 11.58 °GB) y (8.96 °GB).
- El análisis multivariado (ACP) con dos componentes principales explicó el 66.3% de la variación total de los datos. Donde el CP1 contribuyó con el 42.1% y el CP2 el 24.1%.
- En el análisis de componentes principales las variables de mayor importancia para CP1 fueron: AH y REND. Mientras que para CP2 fueron: AP y DF.
- La variable AP se correlaciono negativamente y con alta significancia con DT ( $r = -0.780^{**}$ ); con respecto al AH esta variable se relacionó positivamente con LP ( $r = 0.697^{**}$ ) y negativamente con LE ( $r = -0.742^{**}$ ). Por otro lado, la variable EF se relacionó positivamente con LE ( $r = 0.626^*$ ) y negativamente con las variables LP ( $r = -0.627^*$ ) y AH ( $r = -0.757^{**}$ ). Finalmente, para la variable de REND considerada de mayor importancia, se obtuvo una correlación positiva con el AH ( $r = 0.725^{**}$ ), pero una relación negativa con LE ( $r = -0.808^{**}$ ).
- Entre los genotipos de sorgo seleccionados por presentar buenas características en rendimiento de grano y contenido de SST, sobresalen: 2 (UA-02), 3 (UA-03) y 12 (LES 291).

## VI. LITERATURA CITADA

- Abdi**, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(4), 433–459.
- Agacka** M., Laskowska D., Doroszevska T., Hay FR, Börner A. (2014). Longevidad de semillas de Nicotiana conservadas a bajas temperaturas en bancos de genes ex situ. Seed Science Technol. 2014; 42:355–362.
- Anunciaçã**o PC, Cardoso LM, Queiroz VAV, de Menezes CB, de Carvalho CWP, Pinheiro-Sant'Ana HM, Alfenas RCG. (2018). El consumo de una bebida que contiene sorgo extruido reduce la respuesta glucémica de la comida posterior. euros. J. Nutr. 2018; 57:251–257.
- Arroyo**, A., Balzarini M., Bruno C. y Di Rienzo J. 2005. Árboles de expansión mínimos: ayudas para una mejor interpretación de ordenaciones en bancos de germoplasma. Interciencia. 30: 550-554.
- Avendaño** C. (2023). Bancos de Germoplasma, protectores de la soberanía nacional. Revista La campiña. [https://revistalacampina.mx/2023/11/22/bancos-de-germoplasma-protectores-de-la-soberania-nacional/?utm\\_source=chatgpt.com](https://revistalacampina.mx/2023/11/22/bancos-de-germoplasma-protectores-de-la-soberania-nacional/?utm_source=chatgpt.com)
- Bandyopadhyay**, R., Frederiksen, R. A., & McLaren, N. W. (1998). Ergot: A global threat to sorghum. International Sorghum and Millets Newsletter, 39, 31–34.
- Blum**, A. (2004). Sorghum physiology. In Sorghum: Origin, History, Technology, and Production (pp. 35–51). Wiley.
- Borrell**, A. K., Mullet, J. E., George-Jaeggli, B., van Oosterom, E. J., Hammer, G. L., & Jordan, D. R. (2014). Stay-green traits to improve drought adaptation in

sorghum. Crop Science, 54(5), 1911-1925.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0839>

**Brewer**, M. J., et al. (2017). Sorghum pest management: Sugarcane aphid and beyond. South western Entomologist, 42(1), 27–41.

**Burkhardt**, A. y Hunjan, M. (1989). *Puccinia purpurea*, agente causal de la roya del sorgo. Plant Disease, 73(3), 214-218.

**Capinera**, J. L. (2001). Handbook of Vegetable Pests. Academic Press. ISBN: 9780121588618

**Cave**, R. D. (2000). Biological control of *Spodoptera frugiperda* in Honduras: A review. In Biocontrol News and Information, 21(2), 35N–44N.

**Chen H**, Tian X, Yu Q, Hu W, Chen J, Zhou L. Ind Crop Prod. (2021). El extracto de tallos de sorgo dulce posee actividad antimicrobiana;170: 113746.

**Chessa**, A. (2011). Calidad del sorgo granífero: su valor nutritivo depende del contenido de taninos condensados, aprendamos a reconocer su presencia.[https://www.engormix.com/agricultura/sorgo-granifero/calidad-sorgo-granifero-valor\\_a28976/](https://www.engormix.com/agricultura/sorgo-granifero/calidad-sorgo-granifero-valor_a28976/)

**Chisi**, M. & Peterson, G. Breeding and agronomy. In: J. R. N. Taylor and K. G. Duodu, eds. Sorghum and millets: Chemistry, technology, and nutritional attributes. 2nd ed. Cambridge, United Kingdom: Wood head Publishing, AACC International Press. p. 23-50, 2018.

**Clayton** WD, Renvoize SA. (1986). Géneros Gramíneas del mundo. Londres: Real Jardín Botánico de Kew; 1986. pág. 338–345.

**Cortez** Suarez, L. A., Petroche Torres, D. J., Camba Ramirez, W. E., & Mariscal Santi, W. E. (2022). Comportamiento compostable y biodegradable de bioplásticos producidos con desechos agrícolas. RECIAMUC, 6(3), 546-555.

**Cuevas** HE, Rosa-Valentin G, Hayes CM, Rooney WL, Hoffman L. (2017). Caracterización genómica de un conjunto básico de la colección de

germoplasma de sorgo etíope del USDA-NPGS: implicaciones para la conservación, evaluación y utilización de germoplasma en el mejoramiento de cultivos. *BMC Genom.* 2017; 18:108–124.

- CZ** Insights (2024). Conceptos básicos sobre el sorgo. [https://www.czapp.com/explainers/conceptos-basicos-sobre-el-sorgo/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.czapp.com/explainers/conceptos-basicos-sobre-el-sorgo/?utm_source=chatgpt.com)
- Dillon** SL, Shapter FM, Henry RJ, Cordeiro G, Izquierdo L, Lee LS. (2007). Domesticación para el mejoramiento de cultivos: Recursos genéticos para sorgo y *saccharum* (Andropogoneae). *Ann Bot.* 2007; 100:975–989.
- Doggett** H. *Sorghum*. Londres, Nueva York: Longman; publicado por Wiley; 1970. pág. 140-142.
- Doggett**, H. (1988). *Sorghum* (2nd ed.). Longman Scientific & Technical. pág. 165-187.
- FAO** (2008). *Sorghum and millets in human nutrition*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/t0818e/t0818e00.htm>.
- FAO** (2010). *Second Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. <https://www.fao.org/4/t8385s/T8385S16.htm>
- FAO** (2013). *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Integrated Pest Management for Sorghum: Contarinia sorghicola*. FAO Plant Production and Protection Paper No. 200.
- FAO** (2023). *Trends in global sorghum production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/t0818e/t0818e00.htm>.
- Frederiksen**, R. A. y Renfro, B. L. (1977). Estado mundial del mildiú veloso del maíz y el sorgo. *Anales de la Academia de Ciencias de Nueva York*, 287(1), 345–352.

- Getachew, G.;** Putman, D.; De Ben, C.; De Peters, E. (2016). Potencial del sorgo como alternativa al forraje de maíz. *Revista Americana de Ciencias Vegetales*. 7: 1106-1121.
- Gómez, L.,** Martínez, F., & Herrera, J. (2020). Características agronómicas y nutricionales del sorgo en alimentación animal. *Revista de Producción Animal*, 35(2), 112–120.
- Gómez-Salgado, S.** (2024). Comportamiento Agronómico de Fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) var. Frontera con Nutrición Química y Orgánica en Invernadero. Tesis Licenciatura. UAAAN. 63.
- González, F.** (2011). Sorgo forrajero: Potencial de rendimiento y calidad bromatológica de ocho híbridos comerciales evaluados en la región lagunera. Tesis Licenciatura. UAAAN. 35-36.
- Grupo** Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA). 2022: <https://gcma.com.mx/reportes/mercado-del-sorgo/>
- Guo H.,** Wu H., Sajid A., Li Z. (2022). Cereales integrales: El papel potencial de los componentes funcionales en la salud humana. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2022; 62:8388–8402.
- Heywood, V. H.** (2017). Conservación ex situ de especies amenazadas: métodos, beneficios y desafíos. 121-123.
- Hong, TD,** Linington, S., Ellis, RH. (1996). Comportamiento de almacenamiento de semillas: un compendio. *Manuales para bancos de germoplasma: N.º 4.* Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma.
- House, L. R.** (1985). A guide to sorghum breeding (2nd ed.). International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT).
- INIFAP** (2022). Reporte anual 2022. Ciencia y tecnología para el campo mexicano. CIR Noreste-Coahuila 13-16.

- Instituto** Internacional de Investigación de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT) 2025. <https://www.icrisat.org/about/about-icrisat>.
- Johnson**, D. 2000. Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos. Internacional Thompson Editores S.A de C. V. New York, U.S.A. Pp. 3 – 4.
- Kumara** Charyulu, D, Afari-Sefa, V. y Gumma, MK. (2024) Tendencias en la producción mundial de sorgo: Perspectivas y limitaciones. En: Enfoques ómicos y biotecnológicos para el mejoramiento del sorgo basado en el perfil del producto. Biomedical and Life Sciences (R0), 1 (1). Springer, Singapur, págs. 1-19.
- López**, D. (2019). Taninos en cereales: efectos sobre la digestibilidad en rumiantes y monogástricos. *Nutrición Animal y Ciencia*, 27(1), 77–84.
- Maxted**, N., Ford-Lloyd, B.V., & Hawkes, J.G. (1997). *Plant Genetic Conservation: The In Situ Approach*. Chapman & Hall.
- Mol** Plant. (2019). Agricultura sostenible: desde la siembra y el ensilado de sorgo dulce hasta la alimentación de rumiantes;12(5):603–605.
- Montes** García, N. (2013). RB-NORTEÑO: Sorgo granífero para las áreas de temporal de Tamaulipas y Guanajuato. INIFAP. 11.
- Morais** Cardoso L., Pinheiro SS, Martino HSD, Pinheiro-Sant'Ana HM. (2017). Sorgo (*Sorghum bicolor* L.): Nutrientes, compuestos bioactivos y su posible impacto en la salud humana. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017; 57:372–390.
- Ngugi**, H. K., King, S. B., Abayo, G. O. y Reddy, Y. V. R. (2000). Prevalencia, incidencia y gravedad de las enfermedades del sorgo en el oeste de Kenia. *Plant Disease*, 84(5), 522–528.
- Ngugi**, H. K., King, S. B., y Peacocke, W. J. (2002). Enfermedad del tizón del sorgo: Avances y perspectivas de control. *Plant Disease*, 86(6), 593–603.
- Organización** de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (FAO). 2015. <http://faostat.fao.org/site/342/default.aspx>.

- Patel, A. B., & Sharma, H. C. (2006).** Damage assessment and management of sorghum midge, *Contarinia sorghicola*. *Crop Protection*, 25(7), 715–720.
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H. B., Reyes, F., Oquendo, G., & Milián, I. (2010).** Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y forrajes*, 33(1), 1-11.
- Pérez, A.; Saucedo, O.; Iglesias, J. M.; Wencomo, Hilda B.; Reyes, F.; Oquendo, G. & Milián, Idolkys. (2010).** Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes*. 33 (1):1-26. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942010000100001&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942010000100001&lng=es&tlng=es)
- Prom, L. K., Perumal, R. y Erattaimuthu, S. R. (2011).** Evaluación de fungicidas y resistencia del hospedante para el manejo de la mancha foliar zonada en sorgo. *Informes de Manejo de Enfermedades de Plantas*, 5:CF036.
- Prom, L. K., Perumal, R., Erattaimuthu, S. R. y Montes, N. (2012).** Resistencia genética y manejo de fungicidas en la antracnosis del sorgo. *Revista de Patología Vegetal*, 28(1), 36–43.
- Rodríguez, M., & Pérez, A. (2018).** Adaptabilidad del sorgo a condiciones áridas: implicancias en su composición química. *Ciencia y Agroindustria*, 10(3), 45–52.
- Rooney, L.W. and Miller, F.R. (1981).** Variation in the structure and kernel characteristics of sorghum. *Proc. International Symposium on Sorghum Grain Quality*. ICRISAT, Patancheru, India.
- Rooney, L. W., & Miller, F. R. (1982).** Variation in the structure and kernel characteristics of sorghum. In *Sorghum in the Eighties* (pp. 143–162). ICRISAT.
- Santos, C. M. D., Cônsoli, F. L., & Botelho, P. S. M. (2016).** Life history and parasitism of *Cotesia flavipes* on *Diatraea saccharalis* in sugarcane. *Neotropical Entomology*, 45(2), 202–210.

- Shen S.**, Huang R., Li C., Wu W., Chen H., Shi J., Chen S., Ye X. (2018). Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications. *Molecules* 23: 2-15. <https://doi.org/10.3390/molecules23051203>.
- SIAP-SAGARPA.** (2018). Cosechando números del campo. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/numeros-del-campo>.
- Silva**, M. J., Andrade, C. A., & Torres, J. L. (2014). Evaluación de fungicidas para el control de la roya en sorgo. *Revista Brasileira de Fitopatología*, 39(3), 245–250.
- Singh**, H. S., & Agarwal, N. S. (2004). Biology of sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari*, on sorghum in relation to weather parameters. *Annals of Plant Protection Sciences*, 12(2), 348–351.
- Smith** CW, Frederiksen RA. (2000). *Sorgo: origen, historia, tecnología y producción*. Nueva York, NY: John Wiley and Sons; 2000. pág. 824.
- Sparks**, A. N. (1979). A review of the biology of the fall armyworm. *The Florida Entomologist*, 62(2), 82–87.
- Thakur**, R. P., Rao, V. P. y Mathur, K. (2003). Aprovechamiento de la resistencia de las plantas hospedantes para el manejo del mildiú vellosa en sorgo. *Indian Phytopathology*, 56(1), 1–8.
- Thakur**, R. P., Mathur, K. y Rao, V. P. (2007). Técnicas de detección de enfermedades del sorgo. ICRISAT, Boletín Informativo n.º 76.
- Thomas**, G. Sucher, R. Wyatt, A. Jiménez, I. (2022). Conservación de especies ex situ: predicción de la supervivencia de plantas en jardines botánicos según la procedencia climática. 265-266.
- Upadhyaya**, HD, Narsimha Reddy, K, Vetriventhan, M, Irshad Ahmed, M, Gumma, MK, Thimma Reddy, M y Singh, SK. (2017). Germoplasma de sorgo de África

Occidental y Central mantenido en el banco de genes del ICRISAT: Estado, lagunas y diversidad. *The Crop Journal*, 5 (6). Págs. 518-532.

**USDA.** (2023). Sorghum Explorer. Consultado en febrero del 2024. Sitio web: [https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0459200&sel\\_year=2023&rankby=Production](https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0459200&sel_year=2023&rankby=Production).

**Valle, D.,** Ramírez, M., & Gómez, A. (2012). Manejo integrado del barrenador del tallo en caña de azúcar. *Revista Colombiana de Entomología*, 38(2), 120–130.

**Vanderlip, R. L.** (1993). How a sorghum plant develops. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. 4-10. <http://www.oznet.ksu.edu>

**Wang B.** (2018). Proceso de integración de fermentación-pervaporación-catálisis para la producción de biobutadieno utilizando jugo de sorgo dulce como materia prima; 82:137–43.

**Wright S.** (1931). Evolución en poblaciones mendelianas. *Genética*. 1931. pág. 53.

**Zhang, H.** (2015). Monitoring and mechanisms of insecticide resistance in the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 122, 60–66.

## VII. APÉNDICE

### Anexo 1. Fotografías de los trabajos realizados durante el experimento



