

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**



**“EVALUACIÓN DE HÍBRIDOS EXPERIMENTALES DE SORGO
GRANÍFERO [*SORGHUM BICOLOR* (L.) MOENCH] EN EL VALLE DE
MEXICALI”**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ANIMAL

PRESENTA

Ing. Luis Roberto Ramírez Cervantes

DIRECTORA

DRA. MARISOL GALICIA JUÁREZ

EJIDO NUEVO LEÓN, MEXICALI, B.C. DICIEMBRE 2025

La presente tesis titulada “Evaluación de híbridos experimentales de sorgo granífero [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en el Valle de Mexicali.” realizada por el **Ing. Luis Roberto Ramírez Cervantes** y dirigida por la **Dra. Marisol Galicia Juárez**, ha sido evaluada y aprobada por el Consejo particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS
DE PRODUCCIÓN ANIMAL
Consejo particular**

Directora de tesis



Dra. Marisol Galicia Juárez

Codirector



M.C. Ulises Aranda Lara

Secretaria



Dra. Vielka J. Castañeda Bustos

Sinodal



Dra. Blanca M. Montiel Batalla

“POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER”



INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
Coordinación de Investigación y Posgrado

Oficio núm. 053/2025-2

C. LUIS ROBERTO RAMÍREZ CERVANTES
PRESENTE.

Por este conducto le envío un cordial saludo y al mismo tiempo me permito informarle que el documento de tesis titulado "**Evaluación de híbridos experimentales de sorgo granífero [Sorghum Bicolor (L.) Moench] en el valle de Mexicali**" realizado durante sus estudios (periodo 2020-2 a 2022-1) en la Maestría en Ciencias en Sistemas de Producción Animal, fue recibido y revisado por esta Coordinación para el cumplimiento con los lineamientos establecidos en el programa.

Con base a la evaluación realizada a la tesis mencionada, ésta ha sido **Aprobada** por la Coordinación, por lo cual se turnará por oficio a los integrantes del Comité Particular, quienes una vez revisado el documento, dentro de los tiempos establecidos, emitirán su voto aprobatorio.

Sin otro particular quedo a sus órdenes.



ATENTAMENTE
Ejido Nuevo León, Valle de Mexicali a 08 de octubre de 2025.
"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL SER"


DR. NÉSTOR ARCE VÁZQUEZ
COORDINADOR



AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, por permitir desarrollar mi formación profesional mediante el desarrollo de una investigación que involucro área agrícola experimental, laboratorios y aulas de enseñanza donde mis profesores me compartieron su conocimiento.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutora de tesis, la Dra. Marisol Galicia Juárez, por su apoyo, guía y orientación en el desarrollo de nuestro trabajo especial de grado.

A mi comité particular de tesis la Dra, Vielka Castañeda Bustos y Maestro Ulises Aranda Lara por su apoyo, enseñanza y tiempo dedicado en la tesis.

DEDICATORIAS

A DIOS.

Especialmente a mis padres José Luis Ramírez Cardoso e Irma Cervantes Cruz.

A mis hermanos y hermana.

A mis hijos.

A Nancy, mi compañera en este gran viaje, gracias por todos estos años a mi lado, por creer en mí, por la motivación, por esperar, por siempre levantarme, por tu amor, gracias.

1. ÍNDICE TEMÁTICO

Agradecimientos	IV
Dedicatorias	V
1. Índice temático.....	VI
2. Índice de cuadros.....	VIII
3. Índice de figuras.....	IX
4. Resumen.....	X
5. Abstract.....	XI
6. Introducción	1
7. Objetivo general.....	3
7.1. Objetivos específicos:.....	3
8. Hipótesis	4
9. Revisión de literatura	5
9.1. Mejoramiento genético de forrajes	5
9.2. Mejoramiento genético de sorgo	6
9.3. Cambio climático	8
9.4. Importancia del sorgo granífero.....	9
9.5. Producción de sorgo.....	10
9.6. Calidad nutricional del sorgo	12
9.7. Tolerancia fisiológica a condiciones de estrés hídrico y calor	13
9.8. Descripción morfológica y etapas de desarrollo del sorgo.....	17
10. Materiales y métodos.....	19
10.1. Ubicación del experimento	19
10.2. Material Genético.....	20
10.3. Área experimental y tratamientos.....	20
10.4. Variables agronómicas y de rendimiento	20
10.5. Variables fisiológicas	21
10.6. Componentes nutritivos	24
10.7. Modelo y análisis estadístico.....	24
11. Resultados y discusión	26
11.1. Variables agronómicas	26

11.2. Variables de rendimiento	28
11.3. Variables fisiológicas	30
11.4. Principales componentes nutritivos	34
12. Conclusiones	36
13. Literatura citada	37
14. Anexos	46

2. ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica	17
Cuadro 2. Cuadrados medios y nivel de significancia de las variables agronómicas.	26
Cuadro 3. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de las variables agronómicas	26
Cuadro 4. Cuadrados medios y nivel de significancia de las variables de rendimiento.	28
Cuadro 5. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de las variables de rendimiento.....	29
Cuadro 6. Cuadrados medios y nivel de significancia de las variables fisiológicas ..	30
Cuadro 7. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de las variables fisiológicas.	31
Cuadro 8. Cuadrados medios y nivel de significancia de los principales componentes nutritivos.	34
Cuadro 9. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de los principales componentes nutritivos	34

3. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estados vegetativos-reproductivos de acuerdo con la escala de Vanderlip y Reeves (1972).....	18
Figura 2. Temperaturas mínima, media y máxima mensual en el 2021 en el Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California.	19
Figura 3. Parcela experimental en campo	20
Figura 4. Partes y funcionamiento del sensor de GreenSeeker (Gutiérrez et al, 2011).	24

4. RESUMEN

El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ocupa el segundo lugar en la producción de granos básicos y se considera el principal componente en la formulación de alimentos balanceados para cerdos y aves, el cultivo tiene la capacidad de adaptarse a las altas temperaturas, alta salinidad de los suelos y tolera una baja precipitación. La presente investigación evalúa el rendimiento, y la tolerancia a estrés hídrico y altas temperaturas de 28 híbridos experimentales vs 4 testigos utilizados en la región del Valle de Mexicali, y se seleccionan los 10 de mayor rendimiento para evaluar el porcentaje de sus principales componentes nutritivos y ofrecer a los productores alternativas para hacer frente a la escasez y altos costos de insumos para la elaboración de concentrados alimenticios. Los genotipos se establecieron en campo en el ciclo primavera-verano 2021, bajo un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. Se realizó un análisis de varianza (ANVA) y una comparación de medias con Tukey ($p \leq 0.05$). Las variables agronómicas evaluadas presentaron diferencias significativas a excepción de la variable ancho de la hoja bandera, las variables fisiológicas fueron índice de vegetación de diferencia normalizada y contenido de clorofila en hoja, mientras que todas variables de los componentes nutritivos evidenciaron que existen diferencias significativas. El H15 destacó en peso de cien semillas, mientras que el H21 sobresalió en las variables peso de grano por panoja y número de granos por panoja. El NDVI destaca a dos híbridos con los valores de media más altos y sin diferencias estadísticas entre ellos son H20 y H30, el porcentaje de proteína más alto lo reportó el H10 con un valor de 10.37 %. Los resultados indican que existen híbridos de sorgo granífero que podrían ser nuevas alternativas para diversificar la producción agrícola en el Valle de Mexicali.

Palabras clave: componentes nutritivos, rendimiento, sorgo granífero.

5. ABSTRACT

Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] occupies second place in the production of basic grains and is considered the main component in the formulation of balanced feed for pigs and poultry. The crop has the ability to adapt to high temperatures, high salinity of soils and tolerates low precipitation. The present research proposes to evaluate the performance, the percentage of its main nutritional components, tolerance to water stress and high temperatures of 28 experimental hybrids vs 4 controls used in the Mexicali Valley region, with the purpose of selecting those that best adapt and allow offer producers alternatives to address the shortage and high costs of inputs for the production of food concentrates. The genotypes were established in the field in the spring-summer 2021 cycle, under a completely randomized experimental design with three repetitions. An analysis of variance (ANVA) and a comparison of means with Tukey ($p \leq 0.05$) were performed. The agronomic variables evaluated presented significant differences except for the variable width of the flag leaf, for the physiological variables they were normalized difference vegetation index and leaf chlorophyll content, while all variables of the nutritional components showed that there are significant differences. H15 stood out in weight of one hundred seeds, while H21 stood out in the variables grain weight per panicle and number of grains per panicle. The NDVI highlights two hybrids with the highest average values and without statistical differences between them: H20 and H30, the highest percentage of protein is reported by H10 with a value of 10.37%. The results indicate that there are grain sorghum hybrids that could be new alternatives to diversify agricultural production in the Mexicali Valley.

Key words: nutritional components, yield, grain sorghum

6. INTRODUCCIÓN

El sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es un producto agrícola que tiene múltiples usos a nivel mundial, tanto para el consumo humano como para forraje, entre otros fines. En México, el sorgo es considerado un buen sustituto del maíz amarillo (Agrobit, 2010), tiene un papel importante, tiene el segundo lugar en la producción de granos básicos y se considera el principal componente en la formulación de alimentos balanceados para cerdos y aves (Díaz y Camacho, 2016).

En la actualidad la demanda de sorgo se ha elevado considerablemente, debido a los precios elevados que ha presentado el maíz, de manera que los sistemas de producción de cerdo y aves han preferido adquirir sorgo con la intención de obtener una disminución de los costos en las materias primas para la formulación de raciones (Díaz y Camacho, 2016). En la industria de alimentos balanceados, los granos forrajeros constituyen un 62% de la materia prima, lo cual muestra la importancia de los granos en el sector pecuario (Rural, 2011).

En el Valle de Mexicali en el ciclo primavera verano 2021-2022 se programó una siembra de sorgo forrajero de 7,566 ha y para grano 2,555 ha, temprano y tardío, respectivamente SADER (2023), además que debido a su alta adaptabilidad a suelos salinos el sorgo para grano representa una alternativa económica de cultivo (Macías-Duarte, et al., 2021). Por lo anterior, puede el sorgo ser una alternativa de cultivo forrajero y grano que se adapten a las condiciones climáticas de la región, como las altas temperaturas y alta salinidad en los suelos, además de una baja o nula precipitación, condiciones cada vez más afectadas por el cambio climático, de manera que con finalidad de ofrecer a los productores alternativas que permitan hacer frente a la escasez y altos costos de insumos para la elaboración de concentrados alimenticios.

La escases de precipitación originada por el cambio climático en el noroeste de México es un factor de gran importancia en la producción, debido a que su deficiencia afecta significativamente el rendimiento y el metabolismo de las plantas (López-Santillán *et al.*, 2001), también el estrés por altas temperaturas en las plantas afecta la fenología, fisiología, metabolismo e incluso modifica la expresión génica, por lo cual, “es necesario monitorear el germoplasma disponible e identificar caracteres

fisiológicos, bioquímicos y moleculares promisorios en cultivares y especies ante los escenarios del cambio climático que pudieran ser utilizados en programas de mejora vegetal” (Argentel *et al.*, 2017).

El grado de estrés expresado bajo sequía y calor puede ser indicado también por el consumo relativo de agua en hoja (CRA), el cual es “la medida del estado hídrico actual de la hoja relacionada con su máxima capacidad de retención de agua en completa turgencia puede ser indicativo del grado de estrés expresado bajo sequía y calor” (Yamasaki y Dillenburg, 1999).

El metabolismo del agua en las plantas se afecta por el estrés hídrico, lo que dificulta la absorción de nutrientes, restringe la tasa de transpiración, bloquea el crecimiento, interfiere en el proceso fisiológico y bioquímico lo que disminuye el rendimiento y la calidad (Maghsoudi *et al.*, 2016), disminuye drásticamente los parámetros de crecimiento de biomasa, relación raíz-brote, área foliar y concentración de clorofila (Yin *et al.*, 2014).

Una opción para fortalecer la seguridad alimentaria en las regiones afectadas por la sequía y en el futuro para combatir la escasez de agua prevista en el mundo es el mejoramiento de cultivo de sorgo para grano, ya que es un cereal que puede ser más cultivado y consumido en el mundo, además de su adaptación a los ambientes de baja precipitación y altas temperaturas. De manera que la presente investigación tiene finalidad de sentar las bases en la introducción de nuevos híbridos de sorgo mediante la evaluación de la respuesta agronómica y fisiológica de híbridos experimentales de sorgo provenientes del noreste de México, y poder tener más alternativas de alimentación para ganado, derivado de la demanda en la producción de carne que caracteriza al Valle de Mexicali en Baja California y de sus características agroecológicas, lo que le confiere su competitividad.

7. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento, el porcentaje de sus principales componentes nutritivos y tolerancia a estrés hídrico y altas temperaturas de híbridos experimentales de sorgo bajo condiciones climáticas del Valle de Mexicali.

7.1. Objetivos específicos:

1. Evaluar el rendimiento de los híbridos experimentales de sorgo con la medición de variables agronómicas y de rendimiento de grano.
2. Estimar la tolerancia al estrés hídrico y altas temperaturas de híbridos experimentales de sorgo mediante el análisis de daño a la membrana celular, contenido relativo del agua, contenido de clorofila e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).
3. Determinar el porcentaje de los componentes nutritivos de híbridos experimentales de sorgo mediante un análisis proximal.

8. HIPÓTESIS

Al menos un híbrido experimental presentará rendimientos superiores, mayor porcentaje de sus principales componentes nutritivos y mayor tolerancia al estrés hídrico y altas temperaturas que los testigos utilizados en la región del Valle de Mexicali.

9. REVISIÓN DE LITERATURA

9.1. Mejoramiento genético de forrajes

El mejoramiento selectivo de plantas forrajeras ha apoyado la mejora de los cultivos durante casi un siglo. Los primeros programas de mejoramiento vegetal tuvieron éxito en términos de aumentos de rendimiento (4% a 5% por década), y los rasgos de calidad se convirtieron en objetivos de mejoramiento cada vez más importantes (por ejemplo, mayor resistencia a las enfermedades y digestibilidad). Recientemente, las demandas de sistemas de producción más sostenibles han exigido forrajes de alto rendimiento y alta calidad que permitan una producción animal eficiente con un impacto ambiental mínimo. Para lograrlo es necesario tener en cuenta todo el sistema agrícola y determinar las oportunidades para maximizar la eficiencia en el uso de nutrientes tanto en los componentes forrajeros como en los animales. Los cultivos forrajeros del futuro deben poder utilizar recursos limitados (agua y nutrientes) para maximizar la producción en una superficie de tierra limitada y esto puede requerir que consideremos especies vegetales alternativas a las que se utilizan actualmente (Kingston-Smith, et al., 2013).

La tasa de mejoramiento genético de los forrajes debe aumentar para mantener la competitividad de la industria. Para lograrlo, se requieren nuevas tecnologías de forrajes y estrategias de mejoramiento que puedan complementar y mejorar los enfoques tradicionales. Destacamos la investigación actual y futura en el mejoramiento de plantas, incluidos los enfoques de tecnología genética y genómica para mejorar la tasa de ganancia genética (Barrett, et al., 2015).

Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, y al trabajo de diversos investigadores comprometidos con la generación de forrajes que cumplan con las demandas actuales; la investigación en el mejoramiento genético de los forrajes ha mostrado grandes hallazgos en el transcurso de este arduo camino, mismos que han permitido el evidente incremento en los niveles de producción de diferentes especies forrajeras, tales como el sorgo y la alfalfa, los cuales tienen gran relevancia en la alimentación animal.

9.2. Mejoramiento genético de sorgo

El Instituto Internacional de Investigación de Cultivos para las Zonas Tropicales Semiáridas (ICRISAT) y los respectivos programas nacionales están trabajando en la mejora genética del sorgo para lograr un alto rendimiento, resistencia a la mosca del brote y al moho del grano y características de tallo dulce. Además, el enfoque de investigación en ICRISAT también incluye la adaptación a la temporada de poslluvia, la tolerancia a la sequía terminal y el aumento del contenido de micronutrientes (Fe y Zn) en el grano. La diversificación genética y citoplasmática de progenitores híbridos y variedades para rasgos clave es fundamental para mantener las ganancias de productividad. Los requisitos de calidad de grano y rastrojo de diferentes segmentos del mercado necesitan una atención especial en la investigación de mejoramiento del sorgo para aumentar su valor de mercado (Kumar et al., 2011).

La mayor contribución de los híbridos al rendimiento, en comparación con las variedades mejoradas y autóctonas, se ha demostrado en casi todas las situaciones/condiciones. Los híbridos, además de ser superiores en cuanto al rendimiento de grano y otros caracteres de interés, son estables en todos los entornos. Se ha adoptado un enfoque basado en caracteres para el mejoramiento genético del sorgo mediante el uso de tecnologías de vanguardia de biotecnología vegetal y biología molecular para desarrollar genotipos con un mejor rendimiento bajo estrés durante el crecimiento del cultivo y una mejor calidad del producto con una vida útil prolongada de las semillas, el grano y los nuevos productos de sorgo. La genómica ha avanzado rápidamente durante la última década. La diversidad genética del sorgo ofrece la oportunidad de buscar nuevos genes y alelos que sean responsables de conferir fenotipos deseables. La elaboración de perfiles genómicos mediante marcadores moleculares proporcionaría una gran cantidad de marcadores de ADN. Los programas de selección genómica allanarían el camino para una utilización eficaz del germoplasma de sorgo para el mejoramiento de cultivos (Prabhakar et al., 2022). En México, el mejoramiento genético del sorgo comenzó en 1944 con la generación de la Oficina de Estudios Especiales por parte de la Secretaría de Agricultura (SAG), la cual estaba dedicada a realizar investigaciones en aquellos cultivos considerados como básicos para la alimentación. Posteriormente, en 1961, se creó el Instituto

Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), el cual, a través de su campo experimental de Guanajuato, generó las primeras tecnologías sobre sorgo; y más tarde, entre 1973 y 1974, definió tres áreas para comenzar el mejoramiento genético del sorgo (norte, centro y sur). Dichas áreas fueron consideradas como estratégicas para encaminar el mejoramiento genético del sorgo hacia el cumplimiento de las necesidades específicas de cada región (García et al., 2021).

El mejoramiento genético del sorgo en estas áreas comenzó con la introducción y evaluación de germoplasma de sorgo, derivada de la cooperación de varias instituciones, tales como la Universidad de Texas A&M y el Centro Internacional de Investigación para los Trópicos Semi-Áridos (ICRISAT, por sus siglas en inglés), por citar algunas. El resultado de esta importante colaboración con el INIA fue la generación de los primeros híbridos adaptados de sorgo en México; a partir de los cuales se comenzaron a derivar diferentes líneas genéticas; y posteriormente, la liberación de variedades. Dentro de las características de las variedades generadas por el INIA estuvieron la adaptación al norte de México, tolerancia a enfermedades, sorgo para condiciones de riego, y con androesterilidad génico-citoplásmica (García et al., 2021).

Desde 1985, año en el que el INIA se fusiona con el INIF y con el INIP para formar el INIFAP, se han liberado alrededor de 36 híbridos y variedades; sobresaliendo los sorgos de grano rojo, blanco, y los sorgos para producir bioetanol. A pesar de esto, existen varios retos en el mejoramiento genético del sorgo que requieren ser atendidos; por ejemplo, a corto plazo se requiere continuar mejorando la calidad nutricional y energética del grano y forraje; y a mediano plazo, se requiere mejorar la tolerancia a la sequía y a la salinidad, así como la tolerancia a enfermedades (García et al., 2021).

La mejora genética y la selección de mejores variedades de sorgo granífero han disminuido la producción de taninos y mejorado los niveles de energía y proteína (Ronda et al., 2019). El sorgo en grano puede servir como ingrediente principal de cereales en las dietas o puede ser procesado y mezclado con otros ingredientes para la alimentación de los diferentes sistemas de producción y ser una fuente de energía y proteínas (McCuistion et al., 2018). Por lo anterior, puede el sorgo ser una alternativa

de cultivo forrajero y grano que se adapten a las condiciones climáticas de la región, como las altas temperaturas y alta salinidad en los suelos, además de una baja o nula precipitación, condiciones cada vez más afectadas por el cambio climático, de manera que con finalidad de ofrecer a los productores alternativas que permitan hacer frente a la escasez y altos costos de insumos para la elaboración de concentrados alimenticios.

9.3. Cambio climático

El ritmo creciente de fenómenos adversos relacionados con el cambio climático es asombroso, y con él ha surgido la incertidumbre respecto de sus efectos sobre la producción mundial de alimentos (Bowerman et al., 2023). A nivel mundial, la variabilidad climática ha afectado el rendimiento de los cultivos y la seguridad alimentaria a través de los cambios en las precipitaciones y la temperatura, agravados por los probables aumentos o cambios en la distribución de enfermedades en muchas regiones (Jägermeyr et al., 2021). Además, debido al cambio climático global, así como al riego irrazonable, más del 50% de la tierra cultivable en todo el mundo estará salinizada para 2050, lo que traerá grandes desafíos a la producción de trigo y la seguridad alimentaria mundial (Bailey-Serres et al., 2019). También debe tenerse en cuenta que las temperaturas elevadas pueden favorecer la proliferación y dispersión de patógenos a nuevas regiones, lo que plantea enormes amenazas para los cultivos y facilita la aparición de nuevas enfermedades a nivel local (Xiao et al., 2022).

La adaptación de la agricultura al cambio climático requiere la implementación de una o más de una serie de estrategias complementarias. Estas incluyen el desarrollo de tecnología (genotipos y sistemas de producción) para hacer que la agricultura sea resiliente al cambio climático dentro de la huella actual, el traslado de la agricultura a nuevas ubicaciones para adaptarse al cambio ambiental o la adopción de una agricultura protegida mediante el control parcial o total del medio ambiente. El desarrollo de sistemas de producción agrícola con mayor resiliencia climática es una estrategia importante para enfrentar el cambio climático. Sin embargo, un cambio climático más rápido puede requerir un enfoque más proactivo para la adaptación climática, especialmente para las especies para las que se necesitan genotipos con una larga vida productiva o plantas con una larga vida (Henry, 2020).

“El estado de Baja California presenta los siguientes climas; muy seco en el 69 % de su territorio, seco en el 24% y templado subhúmedo en el 7% restante. Clasificándose en dos grandes regiones climáticas: la primera al Noroeste, con un clima mediterráneo y la segunda al sur y este, con un clima árido. Las lluvias son muy escasas con una precipitación total anual por el orden de 200 mm”. Las temperaturas presentes son; media anual de 18 a 19 °C, más bajas cercanas a 5°C (mes de enero) y las más altas excediendo los 30°C (meses de mayo a septiembre) (INEGI, 2020).

En muchas regiones del mundo los factores de sequía y alta temperatura ocurren juntos, sin embargo, por lo general se investigan por separado, de tal manera que Machado y Paulsen (2001) probaron la hipótesis de que la alta temperatura interactúa con la sequía para afectar las relaciones hídricas de los cultivos, sus resultados demostraron que los cultivos mantienen relaciones de agua casi estables independientemente de la temperatura cuando la humedad es alta, pero la temperatura alta afecta fuertemente las relaciones de agua cuando esta es limitante.

9.4. Importancia del sorgo granífero

Una de las opciones para fortalecer la seguridad alimentaria en las regiones afectadas por la sequía y en el futuro para combatir la escasez de agua prevista en el mundo, es el cultivo de sorgo granífero, ya que es de los que presenta mayor adaptación a los ambientes de baja precipitación y altas temperaturas; además es el quinto cereal más cultivado y consumido en el mundo (FAO, 2016).

El sorgo es uno de los principales cereales producidos en el mundo (Demagnet y Canales, 2020), se adapta bien a zonas agroecológicas cálidas y secas donde es difícil cultivar otros cereales (Cuevas-Reyes et al., 2020). Tiene una adaptación a una amplia gama de condiciones agroecológicas, así como su tolerancia a estreses abióticos, hacen que esta especie sea de interés para los productores agropecuarios (Bravo et al., 2021). Este cultivo cuenta con propiedades morfológicas y fisiológicas que lo ubican en un grupo de materiales altamente productivos, pudiese ser utilizado en forma fresca o ensilada como un aditivo alimenticio en sistemas tradicionales de pastoreo, o como fuente principal en sistemas de producción de bovinos y caprinos en cautiverio, y en general para la alimentación de rumiantes (Vargas-Rodríguez, 2005).

El sorgo tiene como centro de origen al norte de África, lo que le confiere la capacidad de adaptarse a zonas agroecológicas cálidas, secas, y de alta salinidad (Cuevas-Reyes et al., 2020), respecto a la calidad del grano, el sorgo aporta cantidades similares de proteína, en comparación con el trigo y el maíz; así mismo, su valor alimenticio, se relaciona con las condiciones de crecimiento y la variedad (Karaye et al., 2023).

En los últimos años, el uso del sorgo como grano forrajero y, en cierta medida, en otras aplicaciones no alimentarias ha aumentado en países donde tradicionalmente se utilizaba como cultivo alimentario. La calidad nutricional del grano es importante para la aceptabilidad del sorgo en las formulaciones de alimentos para animales. En la alimentación animal, el sorgo se utiliza como un grano integral de alta calidad que tiene un valor nutricional más alto que el maíz amarillo dentado. Sin embargo, el valor nutricional del sorgo se ve afectado por las condiciones de cultivo, las características de la semilla y el procesamiento del grano (Ronda et al., 2019).

El grano de sorgo puede ser utilizado por los sistemas de producción de rumiantes y no rumiantes como fuente de energía y proteína. Numerosos estudios de alimentación han comparado el valor nutricional del sorgo con el de otros granos, incluidos el maíz y el trigo. Debido a las diferencias significativas en el tracto digestivo entre las especies, el grano forrajero se usa de manera única y, por lo tanto, se valora de manera diferente. Cuando se procesa y equilibra adecuadamente con otros ingredientes del alimento, el sorgo puede servir como una fuente importante de grano en la nutrición animal. Para mejorar aún más el valor nutricional del sorgo, una mejor comprensión de las propiedades anti nutricionales clave, incluidos la kafirina, los fenoles y el fitato. Además del uso de sorgo en grano en el sector de la alimentación animal, una creciente industria del etanol ha aumentado la cantidad de grano de sorgo destilado disponible para su uso en el sector de la alimentación animal (McCuistion et al., 2019).

9.5. Producción de sorgo

El Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA) proyecta la producción mundial de sorgo en el ciclo 2022/2023 en 62,7 Mt, un 0,5 % más que la cosecha 2021/22, gracias a mayores rendimientos en Sudán, Malí, Etiopía, Nigeria, Níger y México. Estos

países, además de Argentina, contribuyen a un incremento del 0,6% en el consumo previsto hasta los 62,7 millones de toneladas, compensando la reducción esperada de China y EE.UU. El volumen comercial esperado es de 11,1 Mt, lo que, de concretarse, representaría una reducción anual de 9,1 %, teniendo en cuenta la reducción de las exportaciones de EE.UU. y Australia, así como una reducción de los requisitos de importación de China de 1 Mt (GCMA, 2023).

En México, el sorgo granífero es uno de los tres principales cultivos, después del maíz, ya que se cultiva en casi todo el país, con excepción de Tlaxcala y la Ciudad de México (Rebollar et al., 2016). El volumen estimado para 2022 es de 4,6 millones de toneladas, un 12.2% superior al del año pasado. La región Noreste del país aporta el 41.5% del volumen nacional y el Centro-Oeste el 35.7%. El estado de Tamaulipas es el principal productor, donde se ubican las más importantes regiones productoras de granos (sorgo-maíz) con alta tecnología, sistemas de riego y áreas de secano, con una expectativa de llegar a 1.8 millones de toneladas al final de la zafra, lo que representará 39 % del volumen total esperado para el año de cosecha. Los excedentes de este emprendimiento satisfacen las necesidades del sector ganadero principalmente en las regiones centro y occidente del país (GCMA, 2021; SIAP, 2022).

México ocupa el cuarto lugar en la producción de sorgo para grano a nivel mundial con 5.7 millones de toneladas (FAO, 2024). México no participa en las exportaciones de sorgo y sus importaciones han disminuido significativamente en los últimos 10 años con una CAGR de -21.0 % debido a los altos precios del mercado mundial en comparación con el maíz amarillo (GCMA, 2023). La siembra de sorgo en el estado de Baja California ha disminuido en los últimos años, de acuerdo con la Secretaría de Agricultura Estatal en el ciclo primavera-verano 2020 se realizó una siembra de 559 hectáreas distribuidas en todo el Valle de Mexicali. Posteriormente, en el ciclo primavera verano 2021-2022 se programó una siembra de sorgo forrajero de 7,566 ha y para grano 2,555 ha, temprano y tardío, respectivamente SADER (2023), además que debido a su alta adaptabilidad a suelos salinos el sorgo para grano representa una alternativa económica de cultivo (Macías-Duarte et al., 2021). Es importante mencionar que impulsan desde economía sustentable la producción de sorgo como una alternativa ante sequía del Valle de Mexicali, debido a su bajo consumo de agua en

comparación de otros cultivos, además de su potencial del mercado chino (Voz de la frontera).

9.6. Calidad nutricional del sorgo

El sorgo contiene 7 % de pericarpio, 9 % de germen y 84% de endospermo, la proporción de estos componentes varía según el genotipo y el ambiente en el que se desarrolla el cultivo (Serna-Saldivar y Espinosa-Ramírez, 2019). La composición química del grano de sorgo tiene mayor contenido de almidón que el maíz y su calidad proteica es baja debido al bajo contenido de lisina (Maclean et al., 1981), digestibilidad reducida (Duodu et al., 2003) y menor productividad animal cuando se utiliza en dietas monogástricas (Liu et al., 2015). El sorgo tiene menos aceite que el maíz, lo que significa un contenido de energía metabólica menor (Chessa, 2007), su valor energético productivo del sorgo comparado con el del maíz es de 3.439 vs. 3.527 Cal/kg (Somarriba, 1998).

“La calidad de la proteína del sorgo está relacionada con su capacidad para cubrir las necesidades proteicas de la dieta y depende de dos factores: el porcentaje de proteína total y la distribución de los aminoácidos que la componen, destacando su bajo contenido de lisina”. Sin embargo, actualmente existen genotipos con niveles más altos de este aminoácido, y esta característica puede transferirse a cultivares agrónomicamente deseables a través del mejoramiento genético (Domanski et al., 1997).

El contenido nutricional del grano de sorgo puede reducirse por el contenido de taninos, que son compuestos polifenólicos capaces de formar complejos insolubles con las proteínas generando una disminución de su digestibilidad. Los taninos hidrolizados son ésteres de azúcares de ácidos gálico o elágico distribuidos en todo el grano de sorgo, sin generar una reducción en términos de su valor nutricional, con respecto a los taninos condensados estos se encuentran en su testa pigmentada (catequinas, flavonoides y leucoantocianinas), los cuales afectan su valor alimenticio (Chessa, 2007).

El contenido de proteína del sorgo oscila entre 5 y 19.3 %, con un promedio de 10.7 % según el cultivar utilizado y los factores edafoclimáticos. La proteína de sorgo es

generalmente alta en los siguientes aminoácidos; leucina, ácido glutámico, alanina, prolina y ácido aspártico, entre los más limitados se encuentran; la lisina, la metionina y el triptófano. El porcentaje de lípidos va de un 3 al 4 %, localizados en mayor proporción en el embrión (germen) y menor en el endospermo, siendo el 80% de lípidos insaturados, y los principales ácidos grasos son el ácido oleico y linoleico en un 76%. Con respecto a su valor energético, deriva de los carbohidratos y lípidos presentes, siendo el almidón el principal carbohidrato en aproximadamente un 74% (Domanski et al., 1997).

9.7. Tolerancia fisiológica a condiciones de estrés hídrico y calor

“El estrés por calor se define como una serie de daños irreversibles en el metabolismo y desarrollo de las plantas que pueden causar altas temperaturas y es un fenómeno complejo que incluye la duración del estrés, la tasa de aumento y la temperatura máxima alcanzada” (Porch y Hall, 2013).

La baja disponibilidad de agua en el suelo es el factor limitante más importante en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en zonas lluviosas en México y el mundo; la privación de agua en el suelo puede reducir la tasa de crecimiento y desarrollo del área foliar, que disminuiría la acumulación de materia seca en la planta, también pueden ser intensificados estos efectos por otros factores abióticos desfavorables como las altas ó bajas temperaturas, heladas, salinidad y baja fertilidad del suelo, y otros factores bióticos desfavorables como las enfermedades y plagas y enfermedades (Sourour et al., 2017). Caso particular del sorgo, una baja disponibilidad de agua al momento de la siembra e inicio de la floración, época de antesis, formación y desarrollo del grano provoca reducciones en los componentes del rendimiento y la producción en general, impactando en el índice de cosecha (Canet et al., 2016).

Uno de los principales factores de estrés ambiental que afectan el crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos es la sequía. Comprender los mecanismos de tolerancia de las plantas a este estrés representa uno de los desafíos más importantes para los investigadores en agricultura y para el mejoramiento de plantas (Mujtaba et al., 2016). Esta situación se agudiza al considerar las consecuencias del cambio climático, que exagera las presiones abióticas a escala global al incrementar

la irregularidad de los eventos meteorológicos (Jain y Saxena, 2016). Por tal motivo, existe la necesidad de desarrollar estrategias que permitan que los cultivos se adapten a ambientes específicos, o identificar a una edad temprana aquellos que pueden sostener altos rendimientos bajo estrés hídrico (Khaton et al., 2016).

El sorgo a nivel mundial tiene una alta demanda debido a su uso en la nutrición humana y animal, además de su alto potencial para la producción de energía renovable (Rezende et al., 2017). Este cultivo ha sido clasificado como moderadamente tolerante al estrés hídrico y muchos cultivares de sorgo se adaptan bien a condiciones semiáridas con baja disponibilidad de agua (Achón et al., 2014).

Por lo anteriormente mencionado, se están evaluando diferentes variables fisiológicas (daño a la membrana celular, contenido relativo de agua en hoja, índice de vegetación de diferencia normalizada, contenido de clorofila), que nos permitan identificar aquellos híbridos ó cultivos con mayor tolerancia a estrés hídrico y altas temperaturas.

Contenido relativo de agua en hoja (CRA): Es la expresión más utilizada para medir el nivel de agua en los tejidos (Barrs y Weatherly, 1962). Es una medida del contenido de agua de un tejido en relación con la cantidad total de agua que puede almacenar, expresada en porcentaje, y es una medida del estado hídrico de una planta. Está relacionado con el potencial hídrico, presión y potencial soluto, porque éste y sus componentes son función del volumen de agua en el protoplasma (Ortiz et al., 2003). En las plantas el agua es el componente químico más común, alcanzando valores entre el 90-95% de los tejidos activos, por otro lado, en los órganos adormecidos o en reposo, su disminución es el mecanismo central de regulación de la inactividad, por tanto, el agua es uno de los factores eco fisiológicos que determinan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Barceló et al., 2005).

“La pérdida de agua de las hojas a la atmósfera (transpiración) está asociada con el intercambio de CO₂ necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas, siendo los estomas la vía principal para el intercambio de carbono y agua. Casi toda el agua se transpira a través de los estomas de las hojas y los tallos, por lo que la planta debe lograr un equilibrio entre la absorción de dióxido de carbono para la fotosíntesis y la pérdida de agua por transpiración a medida que se abren y cierran, para lograr un flujo unidireccional del sistema de absorción de agua” (Montes et al., 2016).

Daño a la membrana celular: Según Wahid et al. (2007), las altas temperaturas producen cambios anatómicos, morfológicos y funcionales en las plantas, algunos similares a los inducidos por el estrés hídrico, como la reducción del tamaño celular, reducción de la conductividad estomática y cierre de estomas, cambios en la permeabilidad de la membrana, aumentos en la densidad de estomas y tricomas, además de vasos de xilema más grandes. Por lo antes mencionado, estos cambios suelen dar como resultado un crecimiento deficiente y una productividad vegetal reducida (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017).

Las primeras afectaciones por el estrés de las altas temperaturas son observadas en las membranas celulares (Wang et al., 2011), debido a que un aumento de temperatura conduce a la desnaturalización de proteínas y enzimas, y por ende el incremento de la cantidad de ácidos grasos insaturados (Savchenko et al., 2002). Como resultado, los lípidos de las membranas se vuelven más acuosos y permeables, con una pérdida de electrolitos (Porch y Hall, 2013). La fotosíntesis y la respiración, procesos químicos del metabolismo basal son indispensables en la supervivencia, crecimiento y reproducción de las plantas, quienes dependen de mantener en un buen funcionamiento las membranas celulares en condiciones de estrés (Blum, 1988) y para la tolerancia al calor (Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017, ya que si las plantas se exponen a temperaturas muy altas (50 °C), se producen daños graves a nivel celular y una rápida descomposición de la organización celular en pocos minutos, mientras que si la exposición es a temperaturas moderadamente altas, se produce daño después de un tiempo prolongado (Wahid et al., 2007).

Contenido de clorofila en hoja: “El contenido de clorofila en hoja es el contenido relativo de pigmentos fotosintéticos medido con un equipo de desarrollo analítico de suelos y plantas. El análisis de clorofila revela el estado de desarrollo de la planta y permite determinar el estado fisiológico de la planta, lo que permite identificar posibles estreses” (Ferri et al., 2004). Existen diversos métodos para diagnosticar las necesidades o requerimientos de fertilización, como alternativa viable surgió la medición de la intensidad del color verde de la clorofila, debido a que a diferencia de otros métodos que involucran análisis de laboratorio como la determinación de nitrógeno en plantas y suelos, es un enfoque simple con resultados inmediatos (Durán

et al.,1999). El medidor de clorofila SPAD-502 es otra herramienta de análisis foliar, que emite valores propios al contenido relativo de clorofila de las hojas, que pueden ser utilizados para estimar el estado nitrogenado de las plantas (Montoya-Ruiz y Ordóñez Largaespada, 2009). Los medidores de clorofila son una herramienta de diagnóstico portátil que puede evaluar inmediatamente la cantidad relativa de este compuesto en una hoja sin destruir el tejido. Este valor se calcula a partir de las dos longitudes de onda de la luz transmitida por la placa donde la absorbancia (que es inversamente proporcional a la reflectancia) es diferente. La clorofila es un término general para los pigmentos de hoja verde estrechamente relacionados que comparten la capacidad de absorber energía luminosa y transferirla a otras moléculas en forma de excitación electrónica (Compton, 1990). Entre los complejos orgánicos importantes destaca la clorofila, que es fundamental para la fotosíntesis por su capacidad de emitir electrones cuando es excitada por la luz (Montoya-Ruiz y Ordóñez Largaespada, 2009).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): La medición de la variable NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, acrónimo del inglés *Normalized Difference Vegetation Index* (Araus et al., 1996). “El GreenSeeker (green = verde y seek = buscar) es un instrumento que provee un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los cultivos (Inman et al., 2005, Lan et al., 2009). Además, en comparación con los sensores remotos, el cálculo del NDVI determinado con ayuda del GreenSeeker no es afectado por condiciones atmosféricas adversas como la nubosidad o el polvo en suspensión, por lo que puede ser usado a cualquier hora del día”.

El NDVI se puede utilizar para identificar la variabilidad espacial de la producción de biomasa vegetal de un cultivo, esa variabilidad puede ser causada por variaciones en la población y el crecimiento de las plantas, la nutrición, la incidencia de enfermedades y plagas, entre otros, por lo que, el potencial productivo debe ser estimado durante el

desarrollo vegetativo, para que el manejo pueda ser dirigido, buscando maximizar la productividad (Grohs et al., 2009).

Un método alternativo es la construcción de un sistema de fertilización nitrogenada a partir de una variable vegetal que presenta correlación igualmente alta con el rendimiento de grano y con el NDVI, como es la biomasa seca acumulada en la parte aérea. La ventaja de este método es la estabilidad temporal de la respuesta de la biomasa seca en la emisión de la sexta hoja a las dosis de N aplicadas en esa etapa (Poletto, 2004), lo que permite caracterizar esta respuesta a través de clases de productividad. Por otro lado, la correlación entre el rendimiento de grano y las dosis de N aplicadas en la emisión de la sexta hoja es baja (Mundstock, 1999), ya que esta respuesta está muy influenciada por el ambiente, cambiando entre años. Las mediciones de los índices de vegetación han sido aplicadas exitosamente para evaluar índice de área foliar, biomasa y vigor de los genotipos del trigo y su aplicación más práctica de estos índices es la predicción del rendimiento mediante medidas sucesivas tomadas durante la temporada de crecimiento (Price y Bausch, 1995).

9.8. Descripción morfológica y etapas de desarrollo del sorgo

Cuadro 1. Clasificación taxonómica

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Panicoideae
Tribu	Andropogonae
Genero	Sorghum
Especie	Bicolor

El crecimiento del sorgo no es muy rápido, es más lento que el del maíz, hasta que alcanza los 15 cm de altura, momento en que la planta ya cuenta con un sistema de

raíces establecido e inicia a absorber los nutrientes más rápidamente. De acuerdo con Carrasco et al., (2011) las etapas de desarrollo del sorgo son 10 etapas, las cuales abarcan desde la Etapa 0 denominada emergencia, hasta la etapa nueve denominadas madurez fisiológica (Figura 1).

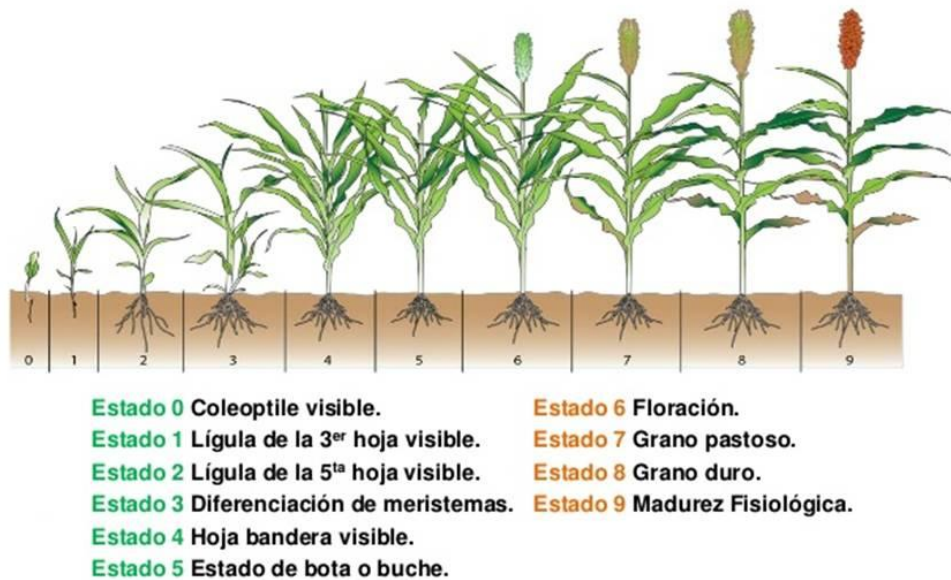


Figura 1. Estados vegetativos-reproductivos de acuerdo con la escala de Vanderlip y Reeves (1972).

10. MATERIALES Y MÉTODOS

10.1. Ubicación del experimento

El ensayo se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado a 50 km al sur de Mexicali, Baja California México (32°24'44,16" N, 115°11'56,87"O) y una altitud de 12 msnm. El tipo de suelo es vertisol, con textura arcillosa de color café con tonalidades grisáceas. La temperatura media anual es de 22 °C y la precipitación media anual de 75.9 mm. El clima es tipo desértico, donde el mes más frío es enero con una temperatura mínima promedio de -1.66 °C y el mes más cálido con una temperatura máxima de 45 °C (INEGI, 2020).

Las temperaturas medias que se observan en la Figura 2, son de la época de crecimiento del cultivo, los datos se tomaron del Sistema de Información para el Manejo de Agua de Riego en Baja California (SIMARBC, 2024).

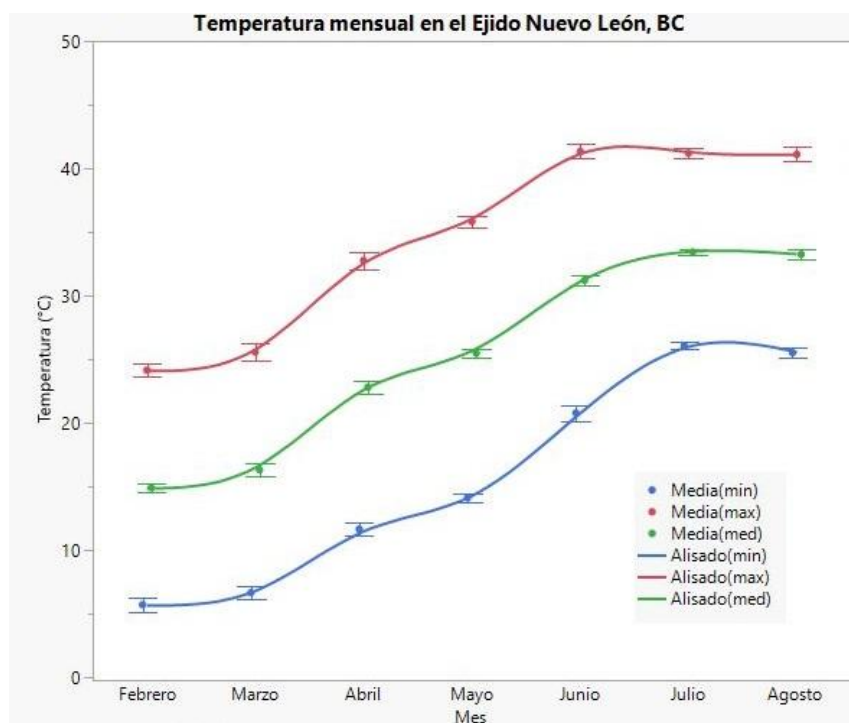


Figura 2. Temperaturas mínima, media y máxima mensual en el 2021 en el Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California.

10.2. Material Genético

Se utilizaron 28 híbridos experimentales donados por el Centro de Investigación Regional Noreste (CIRNE) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); y 4 híbridos comerciales de la región del Valle de Mexicali.

10.3. Área experimental y tratamientos

Los genotipos se establecieron en campo en el ciclo primavera-verano 2021. La siembra de los 32 genotipos se realizó de forma manual, en seco y a chorillo en la parte central del surco con una longitud de 5 m de largo, con una separación entre surcos de 1 m y distancia entre plantas de 0.15 m. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones. La parcela experimental fue de dos surcos de 5 m de largo, con una separación entre surcos de 1 m y distancia entre plantas de 0.15 m. Así también, se realizó el bordeo de la parcela.

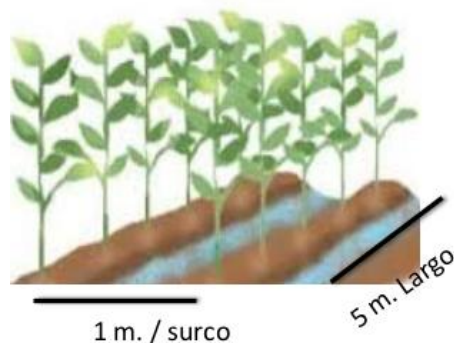


Figura 3. Parcela experimental en campo

10.4. Variables agronómicas y de rendimiento

La medición de variables agronómicas y de rendimiento se realizó en 10 plantas por parcela experimental las cuales fueron seleccionadas al azar y con competencia completa.

Se realizó el registro de días a floración (DF); considerando el número de días transcurridos desde la siembra hasta cuando la mitad de la panoja se encontraba con

las anteras expuestas (días). Al final de la floración se realizó el registro de las siguientes variables agronómicas: Altura de la planta (AP); se midió desde la base del suelo hasta el ápice de la panoja, (cm). Diámetro de tallo (DT); se midió en el primer tercio de la base del tallo al ápice de la panoja (mm). Largo de la hoja (LH); se midió de la lígula al ápice de la hoja bandera (cm). Ancho de la hoja (AH); se midió en la parte más ancha de la hoja bandera (cm). Largo panoja (LP); se midió desde la base al ápice de la panoja.

La cosecha se realizó cuando la semilla se encontraba en madurez fisiológica denominada “presencia de la capa negra” (Valadez-Gutiérrez et al., 2006). Las panojas de las 10 plantas se mantuvieron en proceso de secado a temperatura ambiente durante un mes hasta que su peso fue constante. Cada panoja se desgrano manualmente de forma individual y se registró el peso de 100 semillas (PCS, g), peso de semillas por panoja (PSP, g) y número de semillas por panoja mediante la siguiente fórmula [$NGP = 100 \times (PGP / PCG)$].

10.5. Variables fisiológicas

1) Medición del porcentaje de daño a la membrana celular (DMC)

El muestreo se realizó en época de antesis en tres plantas por parcela, mediante la prueba de termo estabilidad de la membrana celular siguiendo el procedimiento descrito por Blum (1988). Se utilizaron 15 discos de tejido foliar de la hoja madura más joven en cada una de las plantas que se encontraban en estado de antesis, los discos fueron extraídos con un sacabocado de 12 mm de diámetro entre las 9:00 y las 13:00 horas, los discos se enjuagaron tres veces con agua deionizada para eliminar los electrolitos liberados al momento del corte. Los discos foliares se colocaron en tubos de ensayo con 20 ml de agua deionizada; cinco de estos discos se colocaron en baño maría por una hora a una temperatura de 45 °C (DMC 45), otros cinco a una temperatura de 50°C (DMC 50) y cinco a temperatura ambiente. Después de los tratamientos de temperatura, los tubos se dejaron enfriar a temperatura ambiente para posteriormente incubarlos en el refrigerador por 24 horas a una temperatura de 5°C, con el propósito de que los solutos celulares salgan al medio acuoso en proporción al daño de la membrana celular provocado por la temperatura de estrés. Al finalizar el

periodo de incubación se midió la conductividad eléctrica (CE) de cada uno de los tubos de ensaye con un Digital Conductivity Meter (VWR modelo CRB-10M con compensación de temperatura automática), registrándose como la CE inicial. Posteriormente, los tubos de ensaye se colocarán en una autoclave (Yamato Scientific America Inc ® Modelo SN510) a 120 °C por 25 minutos a una presión de 0.10 Mpa, con el propósito de provocar la salida de todos los solutos de las células al medio acuoso. Al salir de la autoclave las muestras se dejaron reposar a temperatura ambiente para medir nuevamente la CE registrándola como la CE final.

El cálculo del porcentaje de daño de la membrana celular se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ DMC} = 1 - \left\{ \frac{1 - (T1/T2)}{1 - (C1/C2)} \right\} \times 100$$

Donde:

T= Tratamiento

C= Control o testigo

1= Medición de CE inicial

2= Medición de CE final

2) Contenido relativo de agua en hoja (CRA)

Los muestreos se realizaron en época de antesis en tres plantas por parcela, mediante la adaptación de la técnica utilizada por Sade et al. (2015).

Se tomaran de 6-10 cm de hoja colocándola en una bolsa de plástico ziploc etiquetada y pesada inicialmente (BW), una vez que la hoja se colocó dentro de la bolsa, se aseguró de que este bien sellada para que no escape el vapor, y se colocó en una caja oscura para posteriormente pesar cada bolsa con la hoja fresca para determinar el peso fresco total (TFW), después se abrió la bolsa y se colocó de 2 a 3 ml de CaCl₂ 5 mM, se selló nuevamente la bolsa y se colocó nuevamente en la caja oscura a temperatura ambiente por ocho horas, posteriormente se sacó la hoja de la bolsa y colocó entre dos toallas de papel para absorber el exceso de agua y se pesó la hoja nuevamente para determinar el peso turgente (TW), finalmente se insertó la hoja en una bolsa de papel y se secó en un horno a 60 °C durante 3-4 días y se pesó la muestra

seca para determinar el peso seco (DW) y calcular el contenido relativo de agua de la hoja con la siguiente formula:

$$CRA = \frac{[(TFW-BW)-DW]}{(TW-DW)} \times 100$$

Donde:

TFW= peso fresco total

BW= bolsa ziploc pesada inicialmente

TW= peso turgente

DW= peso seco

3) Medición del contenido de clorofila (CC)

Los muestreos se realizaron en época de antesis en tres plantas por parcela con el medidor portátil de clorofila Minolta SPAD-502, se tomó una lectura promedio de cinco mediciones en la hoja bandera de manera consistente entre la tercera parte y la mitad del largo de la hoja a partir de su inserción en el tallo, con la superficie adaxial (superior) hacia arriba y se evitó colocar en la nervadura, venas principales o partes gruesas de la hoja en la cámara de medida.

4) Medición del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

La medición de la variable NDVI se cuantifico mediante un GreenSeeker Trimble®, la medición se realizó 60 cm por encima de la altura de planta registrando el promedio de cinco plantas con competencia completa por parcela, se observa en la siguiente figura cómo se realizó la medición (Figura 16).

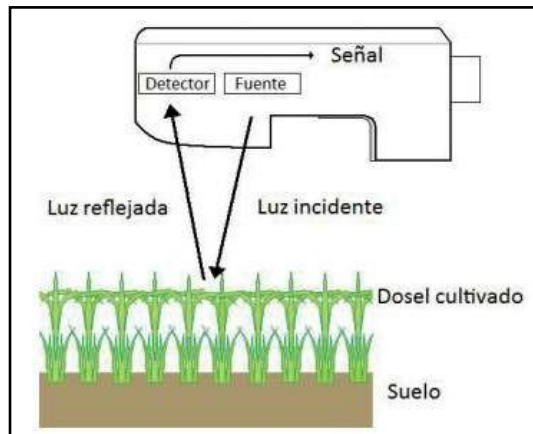


Figura 4. Partes y funcionamiento del sensor de GreenSeeker (Gutiérrez et al, 2011).

10.6. Componentes nutritivos

Esta fase experimental se realizó en el laboratorio de toxicología del Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias, mediante un equipo NIR DA7250 (Near Infrared Reflectance), que permitió determinar los siguientes porcentajes de los componentes nutritivos; de humedad, proteína, aceite y almidón.

Se seleccionaron 10 genotipos que destacaron en los rendimientos de grano, para las mediciones de la reflectancia con el equipo DA 7250 NIR. Se analizaron las tres repeticiones de cada genotipo por triplicado colocando una muestra de grano previamente molida en una criba de 2mm de diámetro.

“En la espectroscopia de reflectancia en el Infrarrojo cercano la muestra se irradia con una o más bandas de radiación de longitud de onda comprendida entre 1 y 2.5 μm , se produce una reflectancia difusa, en la que la radiación penetra a través de la superficie de la capa de partículas, excita los modos de vibración de las moléculas del analito, y luego se dispersa en todas las direcciones, de este modo, se produce un efecto de reflectancia que determina la composición de la muestra” (Interlab, 2012).

10.7. Modelo y análisis estadístico

Se obtuvieron los estadísticos descriptivos para todas las variables de estudio. Para conocer el efecto del genotipo en las variables de estudio se empleó un modelo lineal de efectos fijos; posteriormente se realizó una prueba de comparación de medias por

el método de Tukey, se consideró diferencia significativa a un nivel de $\alpha = 0.05$. El análisis estadístico se realizó empleando el paquete estadístico JMP v17.0.0. (JMP, 2023).

El modelo estadístico:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

$i = 1, 2, 3 \dots t$

$j = 1, 2, 3 \dots n$

Donde:

y_{ij} = Es la variable aleatoria que representa la respuesta de la j-ésima unidad experimental asignada al i-ésimo tratamiento.

μ = Media general

τ_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

ϵ_{ij} = Efecto del error experimental en la unidad j del tratamiento i

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.1. Variables agronómicas

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**2 se observa que todas las variables agronómicas presentaron diferencias significativas a excepción de la variable ancho de la hoja bandera.

Cuadro 2. Cuadrados medios y nivel de significancia de las variables agronómicas.

F.V.	G.L.	AP	LP	AnP	LE	DT	LHB	AnHB
Modelo	31	0.0227**	25.60**	43.78**	314.85**	104.11**	165.95*	2.04ns
Error	249	0.0074	2.87	0.03	4.67	7.78	72.26	1.27
Total	280							

F.V.: Fuente de variación; GL.: Grados de Libertad; AP.: Altura de planta; LP.: Longitud de la panoja; AnP; Ancho de la Panoja; LE.: Longitud de la excersion; DT.: Diámetro del tallo; LHB.: Longitud de la Hoja Bandera; AnHB.: Ancho de la hoja bandera. Prueba de F: *: significativo ($P \leq 0.05$), **: altamente significativo ($P \leq 0.01$), ns: no significativo ($P > 0.05$).

La variable altura de planta fluctuó con valores de media entre 1.03-1.25 m siendo los híbridos 24 y 27 los de mayor altura de planta sin diferencias estadísticas entre ambos (Cuadro 5). Williams-Alanís et al., (2022) encontraron valores que fluctuaron en rangos de media de 1.55 y 2.25 m, es decir el híbrido más bajo fue superior a la media del híbrido más alto reportado en este estudio, estas diferencias se pueden deber a las diferencias en condiciones climáticas de los sitios en que se desarrolló la investigación.

Cuadro 3. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de las variables agronómicas

H	AP	LP	AnP	LE	DT	LHB	AHB
H1	1.05 bc	24.76 ce	7.20 hi	14.76 be	27.97 a	52.43 ab	6.93 a

H	AP	LP	AnP	LE	DT	LHB	AHB
H2	1.07 bc	24.86 ce	5.31 l	15.53 bd	20.90 ch	50.83 ab	7.00 a
H3	1.19 ab	26.87 ac	7.37 gh	14.75 be	18.00 gj	25.67 b	5.40 a
H4	1.11 ac	25.44 ce	9.23 e	17.38 ab	22.90 bg	49.67 ab	6.40 a
H5	1.19 ac	23.74 df	6.48 j	10.95 eh	16.48 hj	41.00 ab	6.57 a
H6	1.13 ac	25.92 ad	9.18 e	16.57 ac	15.07 j	35.67 ab	4.90 a
H7	1.10 ac	25.12 ce	9.38 e	2.64 kl	22.20 bg	33.67 ab	5.50 a
H8	1.15 ac	25.75 bd	4.77 mn	1.70 l	27.09 ab	41.33 ab	5.77 a
H9	1.15 ac	27.32 ac	10.97 b	12.96 cf	15.94 hj	32.00 ab	5.30 a
H10	1.19 ac	26.58 ad	11.65 a	20.08 a	16.53 hj	31.67 ab	6.50 a
H11	1.08 ac	28.77 ab	4.37 np	6.53 gl	22.62 ai	67.00 a	6.53 a
H12	1.12 ac	27.20 ad	6.59 j	13.46 ce	15.59 ij	40.00 ab	8.50 a
H13	1.11 ac	27.23 ac	6.31 jk	5.67 ik	25.58 ac	41.67 ab	5.83 a
H14	1.12 ac	27.18 ac	8.46 f	3.93 jl	18.17 gj	45.67 ab	7.43 a
H15	1.19 ab	27.59 ac	7.52 g	8.84 gi	19.04 ej	34.00 ab	5.77 a
H16	1.13 ac	27.52 ac	5.43 l	11.78 dg	19.88 dj	48.33 ab	4.73 a
H17	1.18 ac	27.23 ac	9.8 d	14.57 be	20.26 di	38.00 ab	6.33 a
H18	1.13 ac	27.12 ac	7.51 gh	18.12 ab	24.89 ad	39.33 ab	5.23 a
H19	1.13 ac	26.74 ad	5.56 l	20.41 a	23.30 af	43.67 ab	5.73 a
H20	1.17 ac	27.54 ac	10.00 d	14.74 be	24.63 ad	46.50 ab	6.93 a
H21	1.17 ac	26.46 ad	10.41c	7.70 hj	22.40 bg	45.00 ab	5.90 a
H22	1.16 ac	28.83 a	9.46 e	17.67 ab	23.99 ae	48.83 ab	6.17 a
H23	1.10 ac	26.73 ad	6.00 k	8.80 gi	20.74 ci	36.33 ab	6.43 a
H24	1.25 a	26.26 ad	7.02 i	9.10 fi	18.56 fj	36.67 ab	4.93 a
H25	1.20 ab	27.11 ac	9.41 e	20.22 a	18.46 fj	32.67 ab	5.33 a
H26	1.18 ac	26.36 ad	10.81 b	11.79 dg	20.96 ch	36.00 ab	5.00 a
H27	1.23 a	26.60 ad	6.32 jk	17.96 ab	21.94 cg	45.33 ab	5.53 a
H28	1.13 ac	25.92 ad	7.30 gi	2.42 kl	22.20 bg	51.00 ab	7.50 a
T29	1.17 ac	26.01 ad	4.97 m	6.16 ik	19.06 ej	45.67 ab	7.95 a
T30	1.07 bc	22.48 ef	3.94 pq	2.28 kl	25.30 ac	54.00 a	6.77 a
T31	1.14 ac	21.48 f	4.39 o	3.81 jl	17.90 gj	45.00 ab	6.33 a

H	AP	LP	AnP	LE	DT	LHB	AHB
T32	1.03 c	22.55 ef	3.89 q	4.71 jl	22.41 bg	48.67 ab	5.67 a

H.: Híbridos; AP.: Altura de planta; LP.: Longitud de la panoja; AnP; Ancho de la Panoja; LE.: Longitud de la excersion; DT.: Diámetro del tallo; LHB.: Longitud de la Hoja Bandera; AnHB.: Ancho de la hoja bandera. Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

La variable longitud de panoja en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, presenta al híbrido 22 con el valor de media más alto de 28.83 cm, resultados similares fueron encontrados por otros autores en híbridos de sorgo con valores de media en un rango de 24 a 30 cm en el estado de Tamaulipas, (Williams-Alanís et al., 2022) y en el Estado de México (Galicia-Juárez et al., 2019).

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el híbrido 10 presentó la media más alta para ancho de panoja con un valor de 11.65 cm, lo que contrasta con el valor más bajo reportado por Galicia-Juárez y colaboradores (2019) con valores de media en un rango de 11.5 y 15.5 cm. Así también, el híbrido 10 presentó la media más alta de longitud de excersión (20.08 cm), mientras que Williams-Alanís et al., (2022) presentaron valores de media para esta variable en un rango de 9 y 16 cm.

En la variable de diámetro de tallo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) presentó el valor de media más alto el híbrido 1. En longitud de la hoja bandera, el híbrido 11 presentó la media con el valor más alto. Mientras que el ancho de la hoja bandera no presentó diferencias estadísticas en los valores de media.

11.2. Variables de rendimiento

Las variables de rendimiento presentaron diferencias significativas en todas las variables (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4**).

Cuadro 4. Cuadrados medios y nivel de significancia de las variables de rendimiento.

F.V.	G.L.	PCS	PGP	NGP
Modelo	27	0.63167**	1010.20**	1460435**

F.V.	G.L.	PCS	PGP	NGP
Error	184	0.06509	146.39	264195
Total	211			

F.V.: Fuente de variación; G.L.: Grados de Libertad; PCS.: Peso de Cien semillas; PGP.: Peso de Grano por Panoja; NGP.: Numero de granos por panoja. Prueba de F: *: significativo ($p \leq 0.05$), **: altamente significativo ($p \leq 0.01$), ns: no significativo ($p > 0.05$).

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5**, la variable de peso de cien semillas fue mayor en el híbrido 15, para las variables peso de grano por panoja y numero de granos por panoja fue mayor en el híbrido 21. Resultados similares fueron reportados por Galicia-Juárez y colaboradores (2019) en el rendimiento de híbridos simples para la variable de peso de cien semillas en rangos de 2.2 y 2.9 g y para peso de grano por panoja con valores de 25.8 a 50.5 g, sin embargo, no fueron similares para la variable de número de granos por panoja reportados en un rango de valores de media de 1027 a 1712.

Cuadro 5. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de las variables de rendimiento.

Híbridos	PCS	PGP	NGP
H1	2.15 ag	50.00 af	2326 ad
H2	2.12 ag	26.25 cf	1238 cd
H3	2.19 ae	28.75 cf	1327 d
H5	2.09 cf	37.08 bf	1756 bd
H6	2.22 ae	32.92 cf	1471 cd
H7	2.38 ac	38.33 bf	1634 cd
H9	2.55 ab	48.75 ac	1860 bd
H10	2.41 ac	57.50 ab	2552 ab
H12	2.25 ae	37.50 bf	1631 cd
H14	2.36 ad	45.83 ad	1911 bd

H15	2.63 a	33.75 cf	1226 d
H16	2.13 be	40.42 bf	1911 bd
H17	2.00 cg	46.25 ae	2215 ad
H18	1.65 fg	29.17 cf	1733 bd
H19	1.80 eg	25.00 cf	1397 cd
H20	2.01 cg	38.75 bf	2029 ad
H21	2.17 be	65.00 a	2975 a
H22	1.72 dg	20.00 cf	1163 cd
H23	2.04 cf	38.59 bf	1887 bd
H24	1.56 g	21.67 f	1386 d
H25	2.03 cg	38.13 bf	1867 bd
H26	2.45 ac	57.08 ab	2327 ac
H27	2.03 cf	39.58 bf	1944 bd
H28	2.08 cf	42.92 bf	2052 bd
T29	1.69 eg	18.75 cf	1109 cd
T30	1.56 g	24.17 ef	1538 cd
T31	2.15 af	46.25 ae	2153 ad
T32	1.92 dg	25.42 df	1310 d

PCS.: Peso de Cien semillas; PGP.: Peso de Grano por Panoja; NGP.: Numero de granos por panoja. Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

11.3. Variables fisiológicas

Las variables fisiológicas presentaron diferencias significativas solo para las variables índice de vegetación de diferencia normalizada y contenido de clorofila en hoja (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6**).

Cuadro 6. Cuadrados medios y nivel de significancia de las variables fisiológicas

F.V.	G.L.	DNVI	CCH	CRA	DMC 45	DMC 50
Modelo	31	0.0025 **	97.35**	115.80 ns	630.17 ns	507.90ns

Error	62	0.00077	15.51	43.75	417.01	353.32
Total	95					

F.V.: Fuente de variación; GL.: Grados de Libertad; DNVI.: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada; CCH.: Contenido de Clorofila en Hoja; CRA.: Contenido Relativo de Agua; DMC 45.: Daño a la Membrana Celular a 45 °C; DMC 50.: Daño a la Membrana Celular a 50 °C. Prueba de F: *: significativo ($p \leq 0.05$), **: altamente significativo ($p \leq 0.01$), ns: no significativo ($p > 0.05$).

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7**, la variable índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) destaca a dos híbridos con los valores de media más altos y sin diferencias estadísticas entre ellos (H30 y H20), sin embargo, no fueron los híbridos con mayor rendimiento de grano como lo asocia Raun et al. (2001) quienes mencionan que esta medición ha sido utilizada para predecir el rendimiento de diferentes especies de grano como la soya y el trigo, además de múltiples localidades, donde el NDVI fue capaz de explicar el 50-65% de las variaciones del rendimiento del trigo.

Cuadro 7. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de las variables fisiológicas.

Híbridos	NDVI	CCH	CRA	DMC 45	DMC 50
1	0.61 ad	36.03 gi	79.75 a	29.94 a	71.94 a
2	0.57 ad	50.14 af	65.93 a	52.19 a	58.96 a
3	0.55 bd	51.13 ae	72.06 a	43.77 a	69.81 a
4	0.60 ad	40.19 ci	77.2 a	33.65 a	70.60 a
5	0.55 bd	45.68 ai	75.52 a	50.86 a	71.47 a
6	0.55 bd	43.36 ai	63.49 a	29.04 a	29.76 a
7	0.54 cd	47.59 ah	61.06 a	20.49 a	36.88 a
8	0.59 ad	39.75 di	71.12 a	32.79 a	69.14 a
9	0.59 ad	39.05 ei	65.40 a	30.91 a	51.87 a
10	0.60 ad	46.57 ai	63.97 a	43.75 a	57.09 a
11	0.59 ad	41.27 bi	72.54 a	8.87 a	36.21 a

12	0.58 ad	45.62 ai	62.10 a	28.48 a	70.78 a
13	0.60 ad	35.57 hi	79.37 a	16.30 a	77.44 a
14	0.54 d	49.12 af	67.44 a	18.00 a	48.47 a
15	0.58 ad	50.09 af	60.70 a	46.44 a	59.98 a
16	0.58 ad	50.24 af	73.07 a	50.61 a	53.36 a
17	0.60 ad	51.2 ae	63.86 a	18.42 a	55.84 a
18	0.62 ad	43.21 ai	66.57 a	8.70 a	51.71 a
19	0.62 ad	40.94 ci	76.78 a	21.18 a	78.07 a
20	0.64 a	43.96 ai	79.25 a	25.27 a	79.20 a
21	0.57 ad	52.6 ac	67.15 a	12.17 a	68.99 a
22	0.60 ad	33.85 i	74.88 a	19.81 a	65.78 a
23	0.57 ad	50.05 af	69.30 a	22.02 a	58.14 a
24	0.61 ad	47.64 ah	59.68 a	28.46 a	57.06 a
25	0.61 ad	48.73 ag	70.59 a	51.40 a	58.47 a
26	0.58 ad	53.97 ab	72.13 a	55.25 a	88.15 a
27	0.61 ad	50.37 af	61.29 a	29.80 a	64.97 a
28	0.56 ad	54.76 a	58.80 a	55.4 a	70.11 a
29	0.59 ad	38.33 fi	75.71 a	12.17 a	63.56 a
30	0.63 ac	52.24 ad	68.40 a	47.43 a	73.01 a
31	0.63 ab	49.61 af	65.87 a	23.03 a	61.55 a
32	0.65 a	43.80 ai	66.40 a	39.90 a	73.85 a

NDVI.: Índice de vegetación de diferencia normalizada; CCH.: Contenido de clorofila en hoja; CRA.: Contenido Relativo de Agua; DMC 45.: Daño a la Membrana Celular a 45 °C; DMC 50.: Daño a la Membrana Celular a 50 °C. Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7**, se observa que la variable de contenido de clorofila en hoja presentó diferencias estadísticas en los valores de media, en un rango de valores de 33.85 a 54.76, mientras que Rangel-Lucio et al., (2002) midieron esta variable en dos variedades de sorgo en cuatro

etapas de desarrollo (macollamiento, anthesis, llenado de grano y cosecha) con valores promedio que fluctuaron de 44 a 47 unidades SPAD.

El contenido relativo de agua no presentó diferencias estadísticas en la prueba de medias, se reportan valores en un rango de 58.80 a 79.75 %. Resultados reportados en sorgo en condiciones de macetas bajo estrés hídrico reportaron un valor de media 67.6 % y en riego de 88.6 % (Galicia-Juárez et al., 2020). La disminución de CRA es uno de los primeros síntomas de deficiencia de agua en los tejidos vegetales y la hoja también se considera el índice más significativo para identificar especies con diferencias contrastantes en la tolerancia a la deshidratación (Agami et al., 2018). La reducción en el CRA bajo estrés hídrico es provocada por el agotamiento del agua del suelo, el sistema de raíces no puede compensar la pérdida de agua durante el proceso de fotosíntesis a través de la conductancia estomática y la tasa de asimilación del agua se ve afectada negativamente durante el estrés por sequía (Sepanlo et al., 2014).

Las variables evaluadas de DMC a 45 y 50 °C no presentaron diferencias estadísticas en los valores de medias, sin embargo, podrían utilizarse para seleccionar aquellos híbridos con valores más bajos de DMC, ya que el daño se asocia a la tolerancia de estrés a sequía y altas temperatura. El mejoramiento genético del sorgo para la tolerancia a la sequía estabilizaría la productividad y contribuiría a la sostenibilidad de los sistemas de producción en entornos propensos a la sequía. El alcance de las pérdidas de rendimiento de grano debido al estrés por sequía depende de la etapa del cultivo y el momento, la duración y la gravedad del estrés por sequía. Se ha observado variación a la respuesta de la tolerancia a sequía y se ha encontrado que es heredable (Nagy et al., 1995). Dado que las respuestas fenotípicas de los genotipos que difieren en la tolerancia a la sequía pueden enmascarse si la sequía ocurre en más de una etapa, se han desarrollado técnicas de detección para identificar genotipos tolerantes a la sequía en cada una de las etapas de crecimiento, por separado (Hausmann, et al., 1998). De los diversos mecanismos para evitar el estrés por sequía en el sorgo, el escape de la sequía (relacionado con duraciones de madurez más cortas), la evitación de la sequía (mantenimiento de un mayor potencial

hídrico en las hojas) y la tolerancia a la sequía (relacionada con un mayor ajuste osmótico) son importantes y están bien caracterizados (Nagy et al., 1995).

11.4. Principales componentes nutritivos

Las variables evaluadas de los principales componentes nutritivos en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.8** evidencian que existen diferencias significativas.

Cuadro 8. Cuadrados medios y nivel de significancia de los principales componentes nutritivos.

F.V.	G.L.	Humedad	Proteína	Aceite	Almidón
Modelo	9	0.02 *	0.25**	0.14 **	10.27 **
Error	9	0.0012	0.01	0.01	0.23
C. Total	19				

F.V.: Fuente de variación; GL.: Grados de Libertad; Prueba de F: *: significativo ($p \leq 0.05$), **: altamente significativo ($p \leq 0.01$), ns: no significativo ($p > 0.05$).

Se enlistan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.9** los principales componentes nutritivos de los 10 híbridos seleccionados de acuerdo con las variables de rendimiento de grano, los porcentajes de humedad fluctuaron en un rango de 7.9 a 8.17, estos resultados contrastan con Rodríguez et al. (2005) quienes analizaron 216 muestras de sorgo y reportan una media de 11.7 % de humedad, es decir el porcentaje de materia seca en los 10 genotipos seleccionados es superior. El H10 presentó un valor de 10.37 % de proteína, superior a la media reportada por Rodríguez et al. (2005) 8.2 % de proteína.

Cuadro 9. Prueba de medias Tukey ($p \leq 0.05$) de los principales componentes nutritivos

Híbridos	Humedad	Proteína	Aceite	Almidón
----------	---------	----------	--------	---------

	(%)	(%)	(%)	(%)
5	8.04 ad	9.41 cd	4.82 c	64.71 de
7	7.95 ce	9.93 b	5.25 b	70.03 a
9	8.03 be	9.24 d	4.99 bc	63.35 e
10	7.9 e	10.37 a	5.07 bc	66.20 cd
12	8.03 be	9.70 bc	4.97 bc	68.77 ab
14	8.13 ab	9.39 cd	5.26 b	67.61 bc
17	8.06 ac	9.99 ab	4.96 bc	68.01 bc
21	8.17 a	10.04 ab	5.20 b	68.66 ab
26	8.13 ab	9.84 b	4.96 bc	64.66 de
27	7.92 de	10.07 ab	5.76 a	69.31 ab

Letras diferentes en cada columna denotan significancia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

12. CONCLUSIONES

Los resultados indican que existen híbridos de sorgo granífero que podrían ser nuevas alternativas para diversificar la producción agrícola en el Valle de Mexicali, debido a que algunos de los híbridos utilizados presentaron mayores rendimientos de grano, porcentaje de proteína, mayor tolerancia a altas temperaturas y estrés hídrico que los híbridos comerciales utilizados como testigos en el presente estudio y cultivados de forma común en la región del Valle de Mexicali.

13. LITERATURA CITADA

- Achón Forno, I., Paniagua Alcaraz, P. L., Villalba Romero, N., & Romero Gavilán, M. (2014). Effects of the application of biostimulants on the tolerance of *Sorghum bicolor* (L.) Moench to salt stress. *Investigación Agraria*, 16(1), 11-20.
- Agami, R. A., Alamri, S. A., Abd El-Mageed, T. A., Abousekken, M. S. M., & Hashem, M. (2018). Role of exogenous nitrogen supply in alleviating the deficit irrigation stress in wheat plants. *Agricultural Water Management*, 210, 261-270.
- Agrobit (2010). Manual del cultivo de sorgo. Cargill. [en línea]. Disponible en: <http://www.agrobit.com/>. (Consultado el 1 de enero de 2023).
- Argentel ML, Garatuza PJ, Armendáriz OMM, Yépez GEA, Arredondo MJT y González AJ (2017) Estrés térmico en cultivo del trigo. Implicaciones fisiológicas, bioquímicas y agronómicas. *Cultivos Tropicales* 38(1):57-67.
- Bailey-Serres, J., Parker, J.E., Ainsworth, E.A., Oldroyd, G.E.D., and Schroeder, J.I. (2019). Genetic strategies for improving crop yields. *Nature* 575:109–118.
- Barrett, B. A., Faville, M. J., Nichols, S. N., Simpson, W. R., Bryan, G. T., & Conner, A. J. (2015). Breaking through the feed barrier: options for improving forage genetics. *Animal Production Science*, 55(7), 883-892.
- Barrs, H.D. and Weatherley, P.E. (1962) A Re-Examination of the Relative Turgidity Techniques for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15, 413-428. <http://dx.doi.org/10.1071/BI9620413>
- Blum, A. (1988). Plant breeding for stress environments. CRC Press Inc., Boca Raton, F.L., USA
- Bowerman, A.F., Byrt, C.S., Roy, S.J., Whitney, S.M., Mortimer, J.C., Ankeny, R.A., Gilliam, M., Zhang, D., Millar, A.A., Rebetzke, G.J., and Pogson, B.J. (2023). Potential abiotic stress targets for modern genetic manipulation. *Plant Cell* 35:139–161.

- Bravo, B. D. A., Pacheco, F. A., Pérez, J. J. R., Mesa, R. R., Yáñez, J. C. O., & Salvatierra, J. B. (2021). Comportamiento agronómico y productivo de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en zonas agroecológicas de la Región Costa del Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(3), 168-178.
- Canet, R., Rivero, L., & ARMENTEROS, M. (2016). Guía técnica para el cultivo del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Instituto de Investigaciones de Granos.
- Carrasco, N., Zamora, M. Y., & Melin, A. (2011). Manual de sorgo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina, 111.
- Chaves-Barrantes, N. F., y Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253.
- Chessa, A. (2007). Calidad del sorgo granífero: su valor nutritivo depende del contenido de taninos condensados, aprendamos a reconocer su presencia. *Revista Forrajes y Granos*, 3.
- Compton, P. L. (1990). *Agronomía del sorgo*. ICRISAT. Centro de Tecnología Agrícola. El Salvador, CA.
- Cuevas-Reyes, V., Sánchez Toledano, B. I., Servín Juárez, R., Reyes Jiménez, J. E., Loaiza Meza, A., & Moreno Gallegos, T. (2020). Factores determinantes del uso de sorgo para alimentación de ganado bovino en el noroeste de México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(4), 1113-1125.
- Ronda, V., Aruna, C., Visarada, KBR y Bhat, BV (2019). Sorgo para alimentación animal. En *Mejora del sorgo para diversos usos finales* (págs. 229-238). Editorial Woodhead.
- Demagnet Filippi, R., & Canales Cartes, C. (2020). Manual cultivo del sorgo forrajero.
- Díaz-Trejo, D., Camacho-Peña, A. (2016). Factores determinantes de la demanda de sorgo en México 2000-2016.

- Domanski, C., Giorda, L. M., & Feresin, O. (1997). Composición y calidad del grano de sorgo. *Sitio Argentino de Producción Animal*, 7, 47-50.
- Duodu, K. G., Taylor, J. R. N., Belton, P. S., & Hamaker, B. R. (2003). Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of cereal science*, 38(2), 117-131.
- Durán, N., Salas, R., Chinchilla, C., & Peralta, F. (1999). Manejo de la nutrición y fertilización en palma aceitera en Costa Rica. In XI Congreso Nacional Agronómico/111 Congreso Nacional de Suelos. Costa Rica. Conferencia (Vol. 85).
- FAO. 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Ferri, C. P., Formaggio, A. R., & Schiavinato, M. A. (2004). Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16, 131-136.
- Jägermeyr, J., Muller, C., Ruane, A.C., Elliott, J., Balkovic, J., Castillo, O., Faye, B., Foster, I., Folberth, C., Franke, J.A., et al. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nat. Food* 2:873–885.
- Henry, R. J. (2020). Innovations in plant genetics adapting agriculture to climate change. *Current Opinion in Plant Biology*, 56, 168-173.
- Rural, F. (2011). Monografías del sorgo grano. Dirección Ejecutiva de Análisis Sectorial. México, DF.
- Galicia-Juárez, M., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Cisneros-López, M. E., Benítez-Riquelme, I., & Córdova-Téllez, L. (2019). Caracteres del rendimiento de grano de híbridos simples y trilineales de sorgo y de sus líneas progenitoras. *Agrociencia*, 53(6), 855-867.
- Galicia-Juárez, M., Sinagawa-García, S., Gutiérrez-Diez, A., Williams-Alanís, H., & Zavala-García, F. (2020). Termotolerancia en líneas de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para grano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(1), 221-227.

- García, N. M., Quintero, V. P., Alanís, H. W., Martínez, M. H., López, M. E. C., & Gallegos, T. M. (2021). Mejoramiento genético de sorgo en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (25), 59-62.
- GCMA (2021). Perspectivas del Mercado de Sorgo, Disponible en: <https://gcma.com.mx/producto/perspectivas-del-mercado-de-sorgo/>
- GCMA (2023) La producción nacional de sorgo abastece los requerimientos de consumo. Consultado el 10 de abril de 2023. disponible en: <https://gcma.com.mx/reportes/mercado-del-sorgo/>
- Grohs, D. S.; Bredemeier, C.; Mundstock, C. M.; Poletto, N. (2009). Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.1, p.101-112. DOI: 10.1590/S0100-69162009000100011.
- Gutiérrez-Soto, M. V., Cadet-Piedra, E., Rodríguez-Montero, W., & Araya-Alfaro, J. M. (2011). El GreenSeeker™ y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 397-403.
- Hausmann, B. I. G., Obilana, A. B., Blum, A., Ayiecho, P. O., Schipprack, W., & Geiger, H. H. (1998). Hybrid performance of sorghum and its relationship to morphological and physiological traits under variable drought stress in Kenya. *Plant Breeding*, 117(3), 223-229.
- INEGI. (2020). Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. Consultado 28 de febrero de 2020. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cbajacalifornia/articulos/atendio-la-secretaria-de-agricultura-planteamientos-de-los-trigueros-del-valle-de-mexical>
- Inman, D; Khosla, R; Mayfield, T. (2005). On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review* 25(3):209-214.
- Interlab (Interlab Diagnostica Limitada, CL). 2012. Análisis NIR (en línea). Boletín 4 p.
Consultado 29 ene. 2016. Disponible en <http://www.interlab.cl>
- Jain, C., & Saxena, R. (2016). Varietal differences against PEG induced drought stress in cowpea. *Octa Journal of Environmental Research*, 4(1), 58-62.

- Karaye, I.U., Maishanu, S.M., Iwal, M.H., Adili, I.S., Shehu, A. y Gatawa, N.S., 2023. Comparative Nutritional and Phytochemical Composition of Sorghum Bicolor (L.) Moench and Zea Mays L. *Journal of Plant Development*, 30(1), pp.129–135. <https://doi.org/10.47743/jpd.2023.30.1.932>
- Khaton, M. A., Sagar, A., Tajkia, J. E., Islam, M. S., Mahmud, M. S., & Hossain, A. K. M. Z. (2016). Effect of moisture stress on morphological and yield attributes of four sorghum varieties. *Progressive Agriculture*, 27(3), 265-271.
- Kingston-Smith, A. H., Marshall, A. H., & Moorby, J. M. (2013). Breeding for genetic improvement of forage plants in relation to increasing animal production with reduced environmental footprint. *Animal*, 7(s1), 79-88.
- Kumar, A., Reddy, B. V. S., Sharma, H. C., Hash, C. T., Srinivasa Rao, P., Ramaiah, B., & Reddy, P. S. (2011). Recent advances in sorghum genetic enhancement research at ICRISAT. *American Journal of Plant Sciences*, 2(4), 589-600.
- Lan, Y; Zhang, H; Lacey, R; Hoffmann, WC; Wu, W. (2009). Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International, The CIGR E-Journal* 11:1-16.
- Liu, S., Fox, G., Khoddami, A., Neilson, K., Truong, H., Moss, A., Selle, P., (2015). Grain Sorghum: A Conundrum for Chicken-Meat Production. *Agriculture* 5, 1224–1251. 1270 <https://doi.org/10.3390/agriculture5041224>
- López-Santillán, J. A., Castro, N. S. y Huerta, J. A. (2001). Influence of water stress on the epicuticular wax load in development stages of sorghum. *Rev. Fitotec. Mex.* 24 (1): 57-62.
- Machado, S. and Paulsen, M.G. 2011. Combined effects of drought and high temperature on water relations of wheat and sorghum. *Plant Soil.* 233, 179-187.
- Macías-Duarte, R., Grijalva-Contreras, R. L., Robles-Contreras, F., Núñez-Ramírez, F., Cárdenas-Salazar, V. A., & Mendoza-Pérez, C. (2021). Índice

- SPAD, nitratos y rendimiento en sorgo en respuesta al suministro de nitrógeno. *Agronomía Mesoamericana*, 293-305.
- Macleán Jr, W. C., de Romaña, G. L., Placko, R. P., & Graham, G. G. (1981). Protein quality and digestibility of sorghum in preschool children: balance studies and plasma free amino acids. *The Journal of nutrition*, 111(11), 1928-1936.
- Maghsoudi, K.; Emam, Y. and Pessaraki, M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *J Plant Nutr.* 2016. 39, 1001-1015.
- McCuiston, K. C., Selle, P. H., Liu, S. Y., & Goodband, R. D. (2019). Sorghum as a feed grain for animal production. *Sorghum and Millets*, 355-391.
- McCuiston, K.C., Selle, P.H., Liu, S.Y., Goodband, R.D. (2018). Sorghum as a feed grain for animal production, *Sorghum and Millets: Chemistry, Technology, and Nutritional Attributes*. AACCI. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00012-5>
- Montoya Ruiz, J. R., & Ordóñez Largaespada, N. O. (2009). Uso del clorofilometro SPAD-502 para diagnosticar la deficiencia de nitrógeno en sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) de la línea ICSVLM-92512 bajo diferentes dosis de nitrógeno en la Finca El Plantel, Zambrano, Masaya (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria, UNA).
- Mujtaba, S. M., Faisal, S., Khan, M. A., Mumtaz, S., & Khanzada, B. (2016). Physiological studies on six wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought stress tolerance at seedling stage. *Agric. Res. Technol. Open Access J*, 1(2), 001-005.
- Mundstock, C.M. (1999). *Planejamento e manejo integrado da lavoura de trigo*. Porto Alegre: Evangraf. 228 p.
- Nagy, Z., Tuba, Z., Zsoldos, F., & Erdei, L. (1995). CO₂-exchange and water relation responses of sorghum and maize during water and salt stress. *Journal of Plant Physiology*, 145(4), 539-544.

- Ortiz, M., Silva, H., Silva, P., & Acevedo, E. (2003). Research article Leaf water parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) and their use in the selection of drought resistant genotypes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(2), 219-233.
- Poletto, N. (2004). Disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o manejo da adubação nitrogenada (2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Porch, T.G., and A.E. Hall. (2013). Heat tolerance. In: C. Kole, editor, *Genomics and breeding for climate-resilient crops*. Vol. 2. Springer-Verlag, Berlin, GER. p. 167-202.
- Prabhakar, Madhusudhana, R., Aruna, C. (2022). Sorghum Breeding. In: Yadava, D.K., Dikshit, H.K., Mishra, G.P., Tripathi, S. (eds) *Fundamentals of Field Crop Breeding*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9257-4_7
- Price, JC. and Bausch, WC. (1995) Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sensing of Environment* 52, 55–65.
- Rangel-Lucio J. A., González, G. A., López, C. T., Huerta, H. V., Castellanos, J. Z., y Moya, E. G. (2002). Comparación de dos pruebas para diagnosticar nitrógeno en sorgo. *Terra Latinoamericana*, 20(4), 383-390.
- Raun, WR., Solie, JB., Johnson, GV., Stone, ML., Lukina, EV., Thomason, WE. y Schepers, JS. (2001) In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal* 93, 131–138.
- Rebollar, S. R., Martínez, J. H., & Soria, E. G. (2016). Optimización espacial y temporal de la producción y comercialización del sorgo grano en México. *RAITES*, 2(4).
- Rezende, R. K. S., Masetto, T. E., Oba, G. C., & Jesus, M. V. (2017). Germination of sweet Sorghum seeds in different water potentials. *American Journal of Plant Sciences*, 8(12), 3062.
- Rodríguez, E. R., Escalera, A. M. A., & Landín, G. M. (2005). Predicción de la composición química del grano de sorgo mediante espectroscopía de

- reflectancia cercana al infrarrojo (NIRS). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 43(1), 1-11.
- Sade, N.; Galkin, E. and Moshelion, M. (2015). Measuring arabidopsis, tomato and barley leaf relative water content (RWC). USA. *Bio-protocol*. 8(5):1-4.
- SADER (2023). Programan la siembra de 157 mil 041 hectáreas para Mexicali en la Cedula de Cultivos 2021-2022. Disponible en www.gob.mx. Consultado el 19 de febrero de 2023.
- Savchenko, G.E., E.A. Klyuchareva, L.M. Abrabchik, and E.V. Serdyuchenko. (2002). Effect of periodic heat shock on the membrane system of etioplasts. *Russ. J. Plant Physiol.* 49:349-359
- Sepanlo, N., Talebi, R., Rokhzadi, A., & Mohammadi, H. (2014). Morphological and physiological behavior in soybean (*Glycine max*) genotypes to drought stress implemented at pre-and post-anthesis stages. *Acta Biologica Szegediensis*, 58(2), 109-113.
- Serna-Saldivar, S.O. y Espinosa-Ramírez, J., (2019). Grain Structure and Grain Chemical Composition, in: *Sorghum and Millets*. Elsevier, pp. 85–129. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00005-8>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2022). Estacionalidad de la producción. En: <http://www.siap.gob.mx/estacionalidad-de-la-produccion/>. Consulta el 30 de octubre de 2022.
- Somarriba, C. (1998). Granos básicos. Universidad Nacional Agraria. Escuela de producción vegetal. Managua, Nicaragua, 61 – 197 pp.
- Sourour, A., Afef, O., Mounir, R., & Mongi, B. Y. (2017). A review: Morphological, physiological, biochemical and molecular plant responses to water deficit stress. *Int. J. Eng. Sci*, 6(1), 2319-1805.
- Vanderlip, R. L. (1993). How a sorghum plant develops.
- Vanderlip, R. L. y H. E. Reeves. (1972). Growth stages of sorghum [*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.]. *Agronomy Journal* 64:13-17.
- Vargas-Rodríguez, C.L. (2005) Valoración nutricional y degradabilidad ruminal de genotipos de sorgo forrajero (*Sorghum spp.*) *Agronomía Mesoamericana*,

vol. 16, núm. 2, julio-diciembre, pp. 215-223 Universidad de Costa Rica Alajuela, Costa Rica.

Voz de la frontera (Consultado el 11 de enero de 2024) Producción de sorgo alternativa ante sequía del Valle de Mexicali - La Voz de la Frontera | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, Mexicali, Baja California y el Mundo

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and experimental botany*, 61(3), 199-223.

Wang, L. C., Tsai, M. C., Chang, K. Y., Fan, Y. S., Yeh, C. H., & Wu, S. J. (2011). Involvement of the Arabidopsis HIT1/AtVPS53 tethering protein homologue in the acclimation of the plasma membrane to heat stress. *Journal of experimental botany*, 62(10), 3609-3620.

Williams-Alanís, H., Aranda Lara, U., Cavazos, G. Á., Zavala Garcia, F., Galicia-Juárez, M., Rodríguez Vázquez, M. D. C., & Elizondo Barrón, J. (2022). Análisis línea x probador para estimar la aptitud combinatoria en sorgo de grano (*Sorghum bicolor* L.). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*,54(2), 12-21.

Xiao, J., Liu, B., Yao, Y., Guo, Z., Jia, H., Kong, L., Zhang, A., Ma, W., Ni, Z., Xu, S., et al. (2022). Wheat genomic study for genetic improvement of traits in China. *Sci. China Life Sci.* 65:1718–1775.

Yamasaki, S. and Dillenburg, L. R. 1999. Measurements of leaf relative water content in *Araucaria angustifolia*. Brazil. *Rev. Brasileira de Fisiología Vegetal.* 11(2):69-75.

Yin, L. N.; Wang, S.W.; Liu, P.; Wang, W. H.; Cao, D.; Deng, X.P. and Zhang, S.Q. Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor*, L. *Plant Physiol. Biochem.* 2014. 80, 268–277.

14. ANEXOS

 **UJED**
Universidad Juárez
del Estado de Durango

 FACULTAD DE
AGRICULTURA
Y ZOOTECNIA

XXXIII SEMANA
INTERNACIONAL
DE AGRONOMÍA

**8 al
10 de SEPT.
del 2021**

EDITORES
DR CIRILO VÁZQUEZ VÁZQUEZ
DR. IGNACIO ORONA CASTILLO
MC JUDITH PUENTES GUTIÉRREZ
DR MANUEL FORTIS HERNÁNDEZ
DR PABLO PRECIADO RANGEL
MC FRANCISCO JAVIER RUIZ ORTEGA

MEMORIA: ISSN:2594-1437

La Agricultura
y los recursos naturales **ante** las contingencias de
salud & cambio climático

<http://faz.ujed.mx>
Venecia, Durango, México

UTILIZACIÓN DEL INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA PARA SELECCIÓN DE HÍBRIDOS DE SORGO GRANÍFERO

Luis Roberto Ramírez-Cervantes¹, Marisol Galicia-Juárez^{1*}, Jesús Santillano-Cazares¹
Ulises Aranda-Lara² y Héctor Williams-Alanís²

¹Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera a Delta s/n Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California. C.P. 21705. Tel: 686-523-0088 ext. 45925. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). Campo Experimental Río Bravo. Carretera Matamoros–Reynosa, km 61 Río Bravo, Tamaulipas, Apdo. Postal. 172, Río Bravo, Tamaulipas, México CP 88900. *marisol.galicia.juarez@uabc.edu.mx

RESUMEN

El cultivo de sorgo tiene gran importancia a escala mundial, pues está comprobado que puede sustituir cereales como el trigo y el maíz en la mayoría de los usos de estos, tanto en la alimentación humana como en la producción de forraje o grano para la ceba de animales y también en la industria. Con el objetivo de utilizar nuevas herramientas para la selección de genotipos de sorgo que se adapten a la región del Valle de Mexicali, se realizaron mediciones del NDVI en 32 híbridos de sorgo para grano con finalidad de seleccionar aquellos que presenten los valores de NDVI más altos, bajo el supuesto de que estos serán los híbridos que mejor se adapten a las condiciones climáticas de la región. El ensayo se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Se utilizaron 28 híbridos experimentales donados por el CIRNE-INIFAP y 4 híbridos comerciales destacados de la región del Valle de Mexicali. Los genotipos se establecieron bajo un diseño experimental de BCA con tres repeticiones. La parcela experimental fue de dos surcos de 5 m de largo, con una separación entre surcos de 1 m y distancia entre plantas de 0.15 m. Al menos tres híbridos experimentales (H20, H19 y H18) pueden superar el rendimiento de los híbridos comerciales de la región, lo que permite ofrecer nuevas alternativas de genotipos de sorgo para grano a los productores del Valle de Mexicali

ABSTRACT

The cultivation of sorghum is of great importance worldwide, since it is proven that it can replace cereals such as wheat and corn in most of their uses, both in human consumption and in the production of forage or grain for the fattening of animals and also in industry. In order to use new tools for the selection of sorghum genotypes that adapt to the Mexicali Valley region, NDVI measurements were carried out in 32 grain sorghum hybrids in order to select those that present the highest NDVI values, under the assumption that these will be the hybrids that best adapt to the climatic conditions of the region. The test was carried out in the experimental field of the Institute of Agricultural Sciences of the Autonomous University of Baja California. 28 experimental hybrids donated by CIRNE-INIFAP and 4 outstanding commercial hybrids from the Mexicali Valley region will be used. The genotypes were established under a BCA experimental design with three replications. The experimental plot consisted of two rows of 5 m long, with a separation between rows of 1 m and a distance between plants of 0.15 m. At least three experimental hybrids (H20, H19 and H18) can exceed the performance of commercial hybrids in the region, which allows offering new alternatives for grain sorghum genotypes to producers in the Mexicali Valley.

INTRODUCCIÓN

Los tres principales países productores de sorgo a nivel mundial durante 2019/20 fueron Estados Unidos, Nigeria y Etiopía con aportaciones del 15, 12 y 9 %, respectivamente. México e India comparten el cuarto lugar con 4.5 MT y 7.8 % de la producción mundial del grano (FIRA, 2020). El cultivo de sorgo pertenece a las plantas C4, las cuales forman compuestos de cuatro carbonos, haciéndola más eficiente en el uso del agua, bióxido de carbono y nutrientes (Chuck et al., 2011). De acuerdo con Taylor y colaboradores (2006) es el mejor cereal en términos de resistencia a la sequía. Es muy eficiente en ambientes cálidos y con intensidad luminosa alta, como los prevalecientes en regiones semiáridas (Rooney y Sema-Saldívar, 2000).

El cultivo de sorgo tiene gran importancia a escala mundial, pues está comprobado que puede sustituir cereales como el trigo y el maíz en la mayoría de los usos de estos, tanto en la alimentación humana como en la producción de forraje o grano para la cebsa de animales y también en la industria (Pérez et al., 2010). El pronóstico de la producción mundial de sorgo para el ciclo 2020/21 es de 62 MT, es decir 7 % por arriba de la cosecha 2019/20, determinado por Estados Unidos, Nigeria, Etiopía, Sudán, India, y México.

En México, el ciclo O-I 2020/21 el estado de Tamaulipas fue el mayor productor de sorgo, se ha visto fuertemente golpeado por problemas climáticos, en la etapa inicial del cultivo siendo afectado por heladas y posteriormente por la falta de agua y escasez de lluvias que mermarán los rendimientos y en consecuencia el volumen de producción hasta del 46.6% menor al obtenido durante el ciclo anterior, se prevé que el presente ciclo sea el más bajo en 20 años. Referente al ciclo PV 2021, el estado de Sinaloa es uno de los que se verán más afectados, ya que la falta de agua no permitirá el establecimiento de un segundo ciclo de cultivo, por lo que se estima que la cosecha de este grano forrajero sea 61.6% menor al ciclo PV 2020 (USDA, 2021).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, acrónimo del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1973; Araus et al., 2002). NDVI es un índice normalizado que cuenta por cambios en la radiación incidente. Un índice normalizado facilita las comparaciones entre mediciones tomadas bajo diferentes condiciones de luz, donde las mediciones hechas bajo radiación incidente alta (ejemplo, a pleno sol) podrían tener mayores valores (mayor diferencia absoluta entre la reflectancia de RED y NIR) que aquellos tomados bajo poca radiación incidente (ejemplo, cielo nublado) (Reynolds et al, 2013).

El objetivo de la presente investigación es utilizar nuevas herramientas para la selección de genotipos de sorgo que se adapten a la región del Valle de Mexicali, se realizaron mediciones del NDVI en 32 híbridos de sorgo para grano con finalidad de seleccionar aquellos que presenten los valores de NDVI más altos, bajo el supuesto de que estos serán los híbridos que mejor se adapten a las condiciones climáticas de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en el campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Ubicado a 50 km al sur de Mexicali, Baja California México (32°24'44,16" N, 115°11'56,87"O) y una altitud de 12 msnm. El tipo de suelo es vertisol, con textura arcillosa de color café con tonalidades grisáceas. La temperatura media anual es de 22 °C y la precipitación media anual de 75.9 mm. El clima es tipo desértico, donde el mes más frío es enero con una temperatura mínima promedio de -1.66 °C y el mes más cálido con una temperatura máxima de 45 °C (INEGI, 2020).

Se utilizaron 28 híbridos experimentales donados por el Centro de Investigación Regional Noreste (CIRNE) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); y 4 híbridos comerciales destacados de la región del Valle de Mexicali. Los genotipos se

establecieron en campo (primavera-verano 2021) bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela experimental fue de dos surcos de 5 m de largo, con una separación entre surcos de 1 m y distancia entre plantas de 0.15 m.

La variable evaluada fue el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) mediante un GreenSeeker Trimble®, la medición se realizó 60 cm por encima de la altura de planta registrando el promedio de cinco plantas con competencia completa por parcela, se observa en la siguiente figura cómo se realizó la medición (Figura 1).

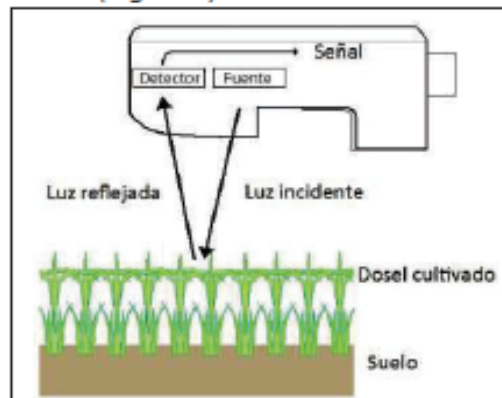


Figura 1. Partes y funcionamiento del sensor de GreenSeeker (Gutiérrez et al, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2 se observa que los tres genotipos con valores de medias de NDVI mas altos son los híbridos experimentales 20, 19 y 18, superando a los cuatro testigos comerciales y adaptados en la región. El GreenSeeker (green = verde y seek = buscar) es un instrumento que provee un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales (especialmente de nitrógeno), el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los cultivos (Inman et al. 2005, Lan et al. 2009). Además, en comparación con los sensores remotos, el cálculo del NDVI determinado con ayuda del GreenSeeker no es afectado por condiciones atmosféricas adversas como la nubosidad o el polvo en suspensión, por lo que puede ser usado a cualquier hora del día.

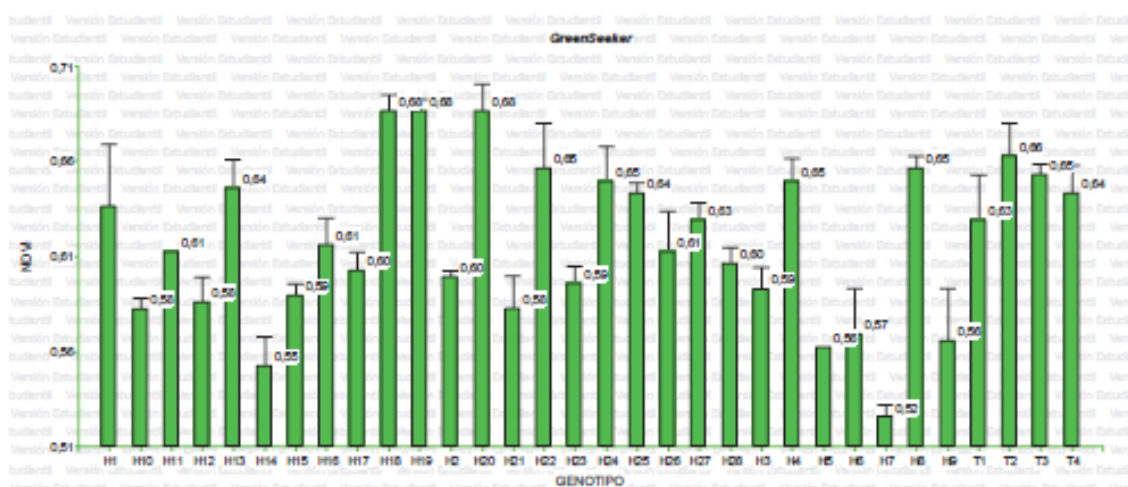


Figura 2. Medias del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en genotipos de sorgo granífero en el Valle de Mexicali.

Las mediciones de los índices de vegetación han sido aplicadas exitosamente para evaluar índice de área foliar, biomasa y vigor de los genotipos del trigo (Wiegand y Richardson, 1990; Baret y Guyot, 1991; Price y Bausch, 1995). Una aplicación más práctica de estos índices es la predicción del rendimiento mediante medidas sucesivas tomadas durante la temporada de crecimiento. El NDVI ha sido usado para predecir rendimiento de grano de soya, trigo durum y trigo de invierno (Aparicio et al., 2000; Ma et al., 2001; Raun et al., 2001), y en experimentos a través de múltiples lugares, el NDVI fue capaz de explicar el 50-65% de las variaciones del rendimiento del trigo (Tucker et al., 1980; Aparicio et al., 2000; Serrano et al., 2000; Raun et al., 2001).

CONCLUSIONES

Al menos tres híbridos experimentales (H20, H19 y H18) pueden superar el rendimiento de los híbridos comerciales de la región, por lo que se pueden ofrecer nuevas alternativas de genotipos de sorgo para grano a los productores del Valle de Mexicali.

REFERENCIAS

Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J.L. y Royo, C. (2000) Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal* 92, 83–91.

Araus, J.L. (1996) Integrative physiological criteria associated with yield potential. In 'Increasing yield potential in wheat: Breaking the barriers'. Ciudad Obregon, Sonora, Mexico. (Eds. Reynolds, M., Rajaram, S. y McNab, A.) pp. 150–166. (CIMMYT).

Baret, F. y Guyot, G. (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161–173

Chuck, H. C. Pérez, C., E. Heredia, E. Olea S. S., (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol.10. Núm.3. Pag. 529-549.

Database.

FIRA (2020) Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. *Prespectivas 2020*.

INEGI (2020). Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. Consultado 28 de febrero de 2020.

- Inman, D; Khosla, R; Mayfield, T. 2005. On-the-go active remote sensing for efficient crop nitrogen management. *Sensor Review* 25(3):209-214.
- Lan, Y; Zhang, H; Lacey, R; Hoffmann, WC; Wu, W. 2009. Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. *Agricultural Engineering International, The CIGR E-Journal* 11:1-16.
- Ma, BL., Dwyer, LM., Costa, C., Cober, ER. y Morrison, MJ. (2001) Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agronomy Journal* 93, 1227–1234.
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Hilda, BW., Reyes, F., Oquendo, G. y Idolkys, M. Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes* [online]. 2010, vol.33, n.1, pp.1-1. ISSN 0864-0394.
- Price, JC. and Bausch, WC. (1995) Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sensing of Environment* 52, 55–65.
- Raun, WR., Solie, JB., Johnson, GV., Stone, ML., Lukina, EV., Thomason, WE. y Schepers, JS. (2001) In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal* 93, 131–138
- Reynolds M.P., Pask A.J.D., Mullan D.M. y Chávez-Dulanto P.N. (Eds.) (2013) *Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para mejorar la adaptación del cultivo*. México, D.F.: CIMMYT.
- Rooney, L. y Serna-Saldívar, S. (2000). Sorghum. En: *Handbook of Cereal Science and Technology*, (Kulp, K., Ponte, J., eds.). Marcel Dekker, New York, USA.
- Rouse, JW., Haas, RH., Schell, JA. y Deering, DW. (1973) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In 'Third ERTS Symposium' pp. 1:309–317.
- Serrano, L., Filella, I. y Penuelas, J. (2000) Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science* 40, 723–731.
- Taylor, J.R.N., Schober T.J. y Bean S.R. (2006). Novel food and non food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science* 44, 252-271.
- Tucker, JC., Holben, BN., Elgin Jr, JH. y McMurtrey, JE., III (1980) Relationship of spectral data to grain yield variation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46, 657–666.
- USDA (2021). Foreign Agricultural Service's Production, Supply and Distribution (PSD) Online
- Wiegand, CL. y Richardson, AJ. (1990) Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: II. Results. *Agronomy Journal* 82, 630–636.