



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Chiná

TESIS

Variabilidad Genética de Materiales de Frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en Condiciones de Estrés Hídrico

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
EN AGROECOSISTEMAS SOSTENIBLES

PRESENTA
YARITZA YOLANDA QUINTAL VARGA

Chiná, Campeche, México a Junio de 2024



Calle 11 s/n entre 22 y 28, C.P. 24520 Chiná, Campeche. Tel. (981) 82-72052 y 82-72082
e-mail: dir_china@tecnm.mx tecnm.mx | china.tecnm.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Chiná

TESIS

Variabilidad Genética de Materiales de Frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) en Condiciones de Estrés Hídrico

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS
EN AGROECOSISTEMAS SOSTENIBLES

PRESENTA
YARITZA YOLANDA QUINTAL VARGAS



Calle 11 s/n entre 22 y 28, C.P. 24520 Chiná, Campeche. Tel. (981) 82-72052 y 82-72082
e-mail: dir_china@tecnm.mx tecnm.mx | china.tecnm.mx





Chíná, Campeche, **11/ junio/2024**

Oficio: Dir/591/2024
ASUNTO: Aprobación

YARITZA YOLANDA QUINTAL VARGAS
PRESENTE

El que suscribe, manifiesta que el Dictamen emitido por el Comité Revisor que integra el sínodo del trabajo de tesis denominado **"VARIABILIDAD GENÉTICA DE MATERIALES DE FRÍJOL (*Phaseolus vulgaris L.*) EN CONDICIONES DE ESTRÉS HÍDRICO"** es aprobado como requisito parcial para obtener el Grado de Maestra en Ciencias en Agroecosistemas Sostenibles.

Sin más por el momento le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
"Avanzando el Progreso"

MARCO GABRIEL ROSADO ÁVILA
DIRECTOR



RECIBIDO CHINA
[Handwritten signature]



COMITÉ REVISOR

Este trabajo fue revisado y aprobado por este Comité y presentado por el C. Yaritza Yolanda Quintal Vargas, como requisito parcial para obtener el Grado de Maestra en Ciencias en Agroecosistemas Sostenibles el día 11 de junio del 2024.

Dra. Mónica Beatriz López Hernández
Presidenta



Dr. Antonio Villalobos González
Secretario



M.C Enrique Arcocha Gómez
Vocal



Dr. Noel Antonio González Valdivia
Vocal Suplente



DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en el presente documento deriva de los estudios realizados para alcanzar los objetivos planteados en mi trabajo de tesis, en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Chiná. De acuerdo a lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Chiná. Por otra parte, de acuerdo a lo manifestado, reconozco de igual manera que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de la información generada en el desarrollo del presente estudio, le pertenecen patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Chiná de manera que si se derivasen de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: Yaritza Quintal

Nombre: Yaritza Yolanda Quintal Vargas

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al instituto nacional de México, campus Chiná por brindarme la oportunidad de ser parte del posgrado Agroecosistemas Sostenibles.

Agradezco a mi comité por el apoyo otorgado para la publicación de un artículo científico derivado del trabajo de la tesis.

Agradezco a mi directora de tesis la Dra. Mónica Beatriz López Hernández, por el apoyo brindado durante todo este tiempo de la realización de la tesis y su conocimiento compartido.

A mi codirector el Dr. Antonio Villalobos González por su paciencia, sus indicaciones, consejos y compartir su conocimiento.

A mis asesores el M.C Enrique Arcocha Gómez por sus consejos y observaciones.

Al Dr. Noel Antonio González Valdivia por facilitar material genético del Laboratorio de Agricultura Agroecológica Orgánica Sustentable (LAAOS) del TECNM Campus Chiná.

Agradezco con mucho cariño a mis padres, quienes me han apoyado incondicionalmente en todo momento, Silvia Vargas y Luis Quintal.

Agradezco a mis compañeros del posgrado y en general a las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, con sus altas y bajas, Ing. Daniel Hass, y en especial al Ing. Eliel Caamal Luna que desde los más profundo de mi corazón le agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo, paciencia y sobre todo su cariño hoy siempre.

Resumen

El estrés por déficit hídrico y altas temperaturas es una amenaza progresiva y especialmente en las áreas agrícolas donde se cultiva frijol, tales como el estado de Campeche, México. El objetivo fue estudiar el efecto del déficit hídrico y alta temperatura sobre la fisiología y morfología de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de invernadero y de campo en la etapa reproductiva (prefloración y floración) y la etapa temprana (emergencia), respectivamente. Los estudios se llevaron a cabo en dos épocas del año, el primero en primavera-verano 2022 (fase reproductiva) y el segundo en verano-otoño 2023 (fase de emergencia), ambos estudios se realizaron en las instalaciones del Tecnológico de México, Campus Chiná, Campeche, México. En la etapa reproductiva el déficit hídrico consistió en la suspensión del riego a los 39 a 65 dds y un tratamiento testigo (sin suspensión de riego). Se utilizaron cuatro variedades de frijol: Peruano, Bayo, Sangre Maya y San Luis. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para ambos factores de humedad. El estrés hídrico y las altas temperaturas durante la etapa de reproductiva del cultivo redujo drásticamente el crecimiento y desarrollo del frijol, que resultó en una variación de la transpiración y temperatura del dosel. Asimismo, una reducción del número de trifolios, botones florales, vainas y producción de biomasa seca total entre los genotipos de frijol. Las variedades Sangre Maya y San Luis presentaron menor efecto del estrés hídrico y altas temperaturas, al obtener mayor regulación de la transpiración y temperatura del dosel, y obtener mayor altura de planta, biomasa seca total y número de trifolios, botones y vainas por planta. Se obtuvo una fuerte asociación entre la altura de planta-biomasa seca total, número de trifolios y vainas por planta entre los genotipos. En el segundo estudio se utilizaron cuatro variedades de semilla de frijol, Peruano, Bayo, Sangre Maya y Michigan, se clasificaron por tamaños de acuerdo a su peso (pequeñas, medianas y grandes). Las siembras se realizaron en camas de cultivos a una profundidad de 15 cm, los tratamientos consistieron en riego continuo y sequía, este último después de un riego de saturación. Se utilizó un diseño de bloques al azar con diez repeticiones en ambos factores de humedad. Los efectos del estrés hídrico y las altas temperaturas durante la etapa de crecimiento (emergencia) del frijol, afectó el porcentaje y la velocidad de emergencia, resultando en una variación en sus estructuras, tales como la longitud y ancho del hipocotilo y el epicotilo, altura de plántula, longitud de la raíz y la producción de materia seca total entre los genotipos y el tamaño de semilla. El genotipo denominado Sangre Maya con tamaño de semilla grande demostró un menor efecto a las altas temperaturas al presentar mayor porcentaje de emergencia y un buen desarrollo del hipocotilo y el epicotilo en condiciones de riego. mientras que el genotipo Michigan con tamaño de semilla chica tuvo un similar comportamiento en ambas condiciones de humedad, al desarrollar mayor radícula y materia seca total. Se encontró una importante correlación entre el hipocotilo, epicotilo, raíz y materia seca total.

Palabras clave: Estrés, Fisiología, Morfología, *Phaseolus vulgaris* L

Genetic variability of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) materials under water stress conditions

Abstract

Water deficit and high temperature stress is a progressive threat, especially in agricultural areas where beans are grown, such as the state of Campeche, Mexico. The objective was to study the effect of water deficit and high temperature on the physiology and morphology of *Phaseolus vulgaris* L. under greenhouse and field conditions at the reproductive stage (pre-flowering and flowering) and the early stage (emergence), respectively. The studies were carried out at two times of the year, the first in spring-summer 2022 (reproductive phase) and the second in summer-autumn 2023 (emergence phase), both studies were carried out at the facilities of the Tecnológico de México, Campus Chiná, Campeche, Mexico. In the reproductive stage, the water deficit consisted of the suspension of irrigation at 39 to 65 das and a control treatment (without suspension of irrigation). Four bean varieties were used: Peruvian, Bayo, Sangre Maya and San Luis. A randomized complete block design with three replicates for both moisture factors was used. Water stress and high temperatures during the reproductive stage of the crop drastically reduced bean growth and development, resulting in a variation in canopy transpiration and temperature. Also, a reduction in the number of trefoils, flower buds, pods and total dry biomass production among bean genotypes. The Sangre Maya and San Luis varieties showed less effect of water stress and high temperatures, by obtaining greater regulation of canopy transpiration and temperature, and obtaining greater plant height, total dry biomass and number of trefoils, buds and pods per plant. A strong association was obtained between plant height-total dry biomass, number of trefoils and pods per plant among genotypes. In the second study, four bean seed varieties were used: Peruvian, Bayo, Sangre Maya and Michigan, classified by size according to their weight (small, medium and large). The sowings were carried out in cultivation beds at a depth of 15 cm, the treatments consisted of continuous irrigation and drought, the latter after a saturation irrigation. A randomized block design with ten repetitions was used in both humidity factors. The effects of water stress and high temperatures during the growth stage (emergence) of the bean affected the percentage and speed of emergence, resulting in a variation in its structures, such as the length and width of the hypocotyl and epicotyl, seedling height, root length and total dry matter production between genotypes and seed size. The genotype called Sangre Maya with large seed size showed a lesser effect at high temperatures by presenting a higher percentage of emergence and a good development of the hypocotyl and epicotyl under irrigation conditions, while the Michigan genotype with small seed size had a similar behavior under both humidity conditions, by developing a larger radicle and total dry matter. An important correlation was found between the hypocotyl, epicotyl, root and total dry matter.

Keywords: Morphology, *Phaseolus vulgaris* L, Physiology Stress.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos	- 6 -
Resumen	- 7 -
Abstract	- 8 -
1. Introducción	- 10 -
2. Antecedentes	- 12 -
3. Justificación	- 15 -
4. Hipótesis	- 16 -
5. Objetivos	- 16 -
5.1 Objetivo general	- 16 -
5.2 Objetivos específicos	- 16 -
6. Referencias	- 17 -
7. Capítulos	- 22 -
7.1 Capítulo 1	- 22 -
ESTRÉS POR DÉFICIT HÍDRICO Y TEMPERATURAS EN FRIJOL (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) EN CAMPECHE, MÉXICO	- 22 -
INTRODUCCIÓN	- 23 -
MATERIALES Y METODOS	- 24 -
RESULTADO Y DISCUSIÓN	- 26 -
CONCLUSIÓN	- 37 -
REFERENCIAS	- 37 -
7.2 Capítulo 2	- 43 -
Temperatura del suelo-aire y profundidad de siembra en plántula de frijol	- 43 -
Introducción	- 44 -
Materiales y Métodos	- 45 -
Resultados y discusión	- 46 -
Conclusión	- 60 -
Referencias	- 61 -
8. Conclusión	- 67 -
9. Anexos	- 68 -

1. Introducción

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se cultiva en todo el mundo y es un alimento sumamente importante como consumo básico en la dieta del humano (Huerta- Lara *et al.*, 2021). México es reconocido como el centro de su origen, al menos como el centro principal de diversificación; siendo uno de cultivos más antiguos, por lo que ciertos hallazgos arqueológicos indican que se conocía desde hace algunos 5000 años a.c (Ulloa *et al.*, 2011).

Taxonómicamente esta reportado de la siguiente manera, Reino: *Plantae*, División: *Magnolophyta*, Sub división: *Magnoliopsida*, Clase: *Rosidae*, Orden: *Fabales*, Familia: *Fabaceae*, Sub familia: *Faboideae*, Tribu: *Phaseoleae*, Género: *Phaseolus*, Especie: *Phaseolus vulgaris* L. (Soukup, 1970).

Es una planta con un tallo herbáceo y dependiendo de su hábito de crecimiento existen cuatro tipos de frijol: tipo I, determinado arbustivo; tipo II, indeterminado arbustivo; tipo III, indeterminado postrado y tipo IV, indeterminado postrado (Pumalpa *et al.*, 2020). Su sistema radical se encuentra en los primeros 20 cms del suelo; las hojas son de dos tipos, simples (primarias) y compuestas (trifoliadas); su flor es *Papilionácea* y su fruto es una vaina (leguminosa); la semilla es exalbuminosa, que puede tener forma cilíndrica, de riñón, esférica u otras (Debouck 1984).

En México se encuentra una gran diversidad de variedades de esta leguminosa, visto de esta forma los más consumidos son negros, pintos, flores de mayo y junio, peruanos y bayos (Licea *et al.*, 2010). Sembrándose más de un millón de hectáreas de frijol, principalmente en el altiplano semiárido (centro-norte), que oscila entre los 1,800 y 2,200 msnm (Huerta- Lara *et al.*, 2021). Ocupando el octavo lugar a nivel mundial; los principales estados productores de frijol son Zacatecas, Sinaloa, Nayarit y Chiapas, aportando el 68.54 % de la producción nacional (Armenta-López *et al.*, 2021).

Durante muchos años la siembra de *P. vulgaris* ha sido una actividad del campesinado, sin embargo, la producción es insuficiente a causa de varios factores como el aumento de los consumidores, la falta de tecnología y principalmente el cambio climático (Domínguez *et al.*, 2019). Un reflejo de esto cambios es la alta temperatura del aire y la sequía, que afecta el crecimiento del cultivo de frijol en diferentes etapas del desarrollo (Barrios-Gómez *et al.*, 2011). El estrés abiótico es la causa principal de las pérdidas de cultivos en todo el mundo, reduciendo el rendimiento de la mayoría de las plantas hasta en un 50 % (Méndez y vallejo, 2019).

Los aumentos en la temperatura del aire, incluso un grado por encima de un nivel umbral, se consideran estrés por calor en las plantas (García-Rodríguez *et al.*, 2016). El estrés por calor en la mayoría de los cultivos tropicales y subtropicales se produce cuando las temperaturas

aumentan por encima de 32 a 35 °C (Jarma *et al.*, 2012). El impacto del estrés por calor depende de la intensidad, la duración de la exposición y el grado de temperatura elevada, teniendo graves implicaciones en el desarrollo de las plantas al afectar su crecimiento y función (Chávez-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017). Además, el aumento de la frecuencia del estrés térmico puede alterar los procesos fisiológicos de las plantas, lo que resulta en inhibición fotosintética, reducción del anabolismo del nitrógeno, mayor catabolismo proteico y acumulación de los productos finales de la peroxidación lipídica (Jimenez *et al.*, 2012). Las plantas sometidas a estrés térmico muestran períodos vegetativos y de llenado de vainas más cortos (Chávez-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017b).

Por otro lado, el déficit de agua en las plantas provoca la inhibición de la fotosíntesis al alterar la regulación de la vía mediante el cierre de las estomas y disminución del flujo de CO₂ hacia los tejidos del mesófilo (Chaves-Barrantes *et al.*, 2018). Además, la respiración, la translocación, la absorción de iones, los carbohidratos, la asimilación de nutrientes y los promotores del crecimiento se ven alterados bajo estrés (Veobides *et al.*, 2018). Bajo estrés, las plantas desarrollan un mecanismo defensivo y homeostasis celular mediante la acumulación de osmolitos (es decir, prolina, glicina betaína) y proteínas, aumentando así la tolerancia de las plantas al estrés (Moreno, 2009).

Sin embargo, la tolerancia de las plantas al estrés abiótico es un rasgo complejo que involucra una variedad de mecanismos moleculares, bioquímicos y fisiológicos (Domínguez-Suarez *et al.*, 2019). La respuesta de las plantas al estrés depende de las especies y genotipos, la duración y gravedad del déficit hídrico, y la edad y etapa de desarrollo (Florido y Bao, 2014).

Por lo tanto, es de importancia seguir profundizando en el estudio de variedades comerciales de frijol en el trópico tolerantes al estrés hídrico y a las altas temperaturas en condiciones de invernadero.

2. Antecedentes

Las variaciones climáticas globales han ocurrido de manera constante a lo largo de la historia de la tierra; sin embargo, la concentración de gases de efecto invernadero es demasiado que parece inevitable que no se presenten estos cambios, los cuales forzarán al sector agrícola para tomar medidas de adaptación. (López y Hernández, 2016). Aunque los efectos de los cambios en el clima sobre la producción de cultivos varían de una región a otra, se estima que los cambios pronosticados tengan efectos de mayor alcance principalmente en zonas tropicales que, por su régimen de precipitación (Altieri y Nicholls, 2009).

En México la agricultura es vulnerable ante el clima extremo, principalmente en el norte del país, donde la escasez de agua es un problema y en el sur del país las tormentas tropicales causan daños importantes a la producción agrícola (Esparza, 2014), siendo los agricultores de pequeña escala los más afectados ya que a menudo ocupan tierras que dependen de las precipitaciones para la producción de cultivos, en especial la agricultura de secano al adaptarse a los patrones de precipitación, temperatura y eventos climáticos extremos (Olivera, 2022).

En el sureste del país las principales siembras de frijol se realizan en el ciclo otoño-invierno (septiembre-octubre) y primavera-verano (mayo-junio) y un tercer ciclo de invierno-primavera (diciembre-febrero) (Tosquy *et al.*, 2020), siendo en condiciones de humedad residual (principalmente con la humedad de las lluvias almacenada en el suelo) y en verano, en condiciones de temporal (Morales *et al.*, 2015).

Los principales impactos del estrés por calor en varios cultivos de leguminosas son la disminución del porcentaje de germinación, la emergencia de las plántulas, las plántulas anormales, el vigor deficiente de las plántulas y la reducción del crecimiento de radicales y plúmulas en las plántulas germinadas (Reed *et al.*, 2022). Así mismo, la disminución del crecimiento de las plántulas por estrés hídrico se relaciona directamente con la reducción de entrada de agua hacia los tejidos. Este factor es esencial para el desarrollo de la presión de turgencia para que ocurra el alargamiento celular (Luna-Flores *et al.*, 2012).

Según Rosabal *et al.* (2014) el crecimiento del hipocótilo y el epicotilo tiene un papel importante en la emergencia de la planta, lo cual está influenciado por las condiciones ambientales. Sin embargo, los órganos subterráneos (raíz o radícula) de la planta se desarrollan más rápido que los órganos aéreos (tallo o hipocótilos), esto con el fin de lograr su aclimatización (Barrios-Gómez *et al.*, 2012).

Esto lo confirma Mendoza *et al.* (2020) en variedades de frijol cubano bajo estrés hídrico al presentar efectos negativos bajo el este estrés afectando la germinación de las semillas, significando una disminución del porcentaje de germinación, el escaso desarrollo de raíces

laterales y reducción de la longitud de la raíz principal, del hipocótilo y el epicótilo respectivamente, perjudicando la aparición de las hojas verdaderas.

De igual forma, Domínguez et al. (2014) observaron un 60 % de inhibición en la germinación de variedades de *Phaseolus vulgaris* y la incidencia negativa del epicotilo y en consecuencia la parte aérea en etapas tempranas de frijol. Así mismo, la variable raíz se vio afectado, reduciendo su alargamiento, esto para evitar la deshidratación del tejido, lo cual se debe en parte a la arquitectura de la raíz (Ruscitti *et al.*, 2007).

Por otro lado, Maqueira- López et al. (2021) en un estudio previo afirman que temperaturas superiores a 30 °C disminuyen la velocidad de germinación en los cultivares de frijol, sin embargo, afirma que el efecto de la temperatura está estrechamente relacionado con el material genético con que se esté trabajando (González *et al.*, 2021).

Así, el estrés por calor puede causar dos tipos de daños a la planta, daños directos o indirectos. La lesión directa: incluye agregación y desnaturalización de proteínas, así como aumento de la fluidez de las membranas (Sanabria y Lazo, 2018). Lesión indirecta: incluye la inactivación de enzimas en cloroplastos y mitocondrias, inhibición de la síntesis de proteínas, mayor degradación de proteínas y pérdida de la integridad de la membrana (Liu *et al.*, 2019). Todas estas alteraciones provocan daño celular o incluso la muerte en unos pocos minutos, lo que en última instancia conduce a un colapso catastrófico de la organización celular (Kaushal *et al.*, 2016).

De acuerdo con Sita et al. (2017) la fotosíntesis se reduce, ya que es la parte más termosensible de la función de las plantas y los procesos reproductivos se ven afectados negativamente, incluida la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico, la viabilidad de los óvulos, las posiciones del estigma y del estilo, el número de granos de polen retenidos por el estigma, los procesos de fertilización y posfertilización, y el crecimiento del endospermo, el proembrión y embrión fertilizado (Siddiqui *et al.*, 2015).

En informes previos, Sharma et al. (2016) evaluaron el efecto de las altas temperaturas en líneas de frijol Mungo en dos épocas de siembra, marzo alcanzado temperaturas de <40/28 °C en la etapa reproductiva y abril >40/28 °C. Los resultados indicaron que las plantas sembradas en abril las hojas mostraron síntomas de enrollamiento, quemado y clorosis. Además, la fenología se aceleró, lo que provocó una reducción considerable del área foliar, biomasa, flores y vainas. Además, la función reproductiva se condensó claramente en la mayoría de las líneas, lo que provocó un aumento de los abortos de flores y vainas, lo que implica que el estrés por calor durante la fase reproductiva de las plantas sembradas tardíamente resultó perjudicial.

De acuerdo con Rodríguez et al. (2014) en el ciclo invierno- primavera la falta de humedad durante las etapas de floración y formación de vainas, provocó en doce genotipos de

frijol evaluados, una reducción en la producción de grano. En contraste, Guamán et al. (2020) evaluaron la adaptabilidad de cuatro variedades de frijol en el ciclo primavera-verano, demostrando que la variedad llamada Centenario obtuvo menor tamaño, pero alcanzó mayor rendimiento; mientras la variedad Vilcabamba gastó energía creciendo, siendo un síntoma de estrés por la falta de adaptabilidad.

De acuerdo con Rosas (2011) uno de los indicadores de la tolerancia a la sequía es asociado a la profundidad de la raíz, por lo que una mayor eficiencia del crecimiento y producción de las variedades mejoradas es cultivarlas bajo estas limitantes lo cual se traduce a mayor vigor vegetativo y rendimiento de grano en comparación de las variedades tradicionales (Pedroza *et al.*, 2013).

Identificar y priorizar prácticas adaptativas y sustentables no es tarea fácil, por lo que algunos estudios demuestran que la Implementación y la selección de variedades con un grado de tolerancia al estrés hídrico y las altas temperaturas con potencial productivo en cultivos de importancia agroalimentaria puede ser una gran alternativa (Montero-Tavera *et al.*, 2019).

Con la finalidad de establecer agroecotipos específicos para el cultivo de frijol la composición genética define las características morfológicas y adaptaciones fisiológicas de las plantas, además, el efecto del genotipo en la respuesta al estrés hídrico ha sido observado en diversos estudios (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2023).

En la actualidad, se busca obtener y producir frijol de calidad que permita ayudar a los agricultores de la zona, permitiéndoles ser más eficientes con una variedad resistente y adecuada, que permita obtener buenos rendimientos ya que algunos productores utilizan semillas del ciclo anterior para la siembra, cuya calidad fisiológica es desconocida. (Castañeda *et al.*, 2006)

3. Justificación

En la actualidad los agricultores mexicanos ubicados en ambientes frágiles se vuelven vulnerables a los impactos negativos del cambio climático, para estas personas, el clima puede tener un impacto desastroso en sus vidas y medios de sustento.

Se esperan enormes cambios en su productividad, ya que dependen de cultivos que potencialmente serán afectados, siendo estos los alimentos básicos tales como el maíz, frijol, papas y arroz.

La producción de frijol común (*Phaseolus vulgaris L.*) se reduce cuando está bajo estrés hídrico y a altas temperaturas por lo que una estrategia es la obtención de cultivares resistentes o tolerantes teniendo en cuenta los mecanismos fisiológicos y morfológicos que ocurren en las plantas en respuesta a estos factores.

Para ello se requiere determinar las características morfológicas, fisiológicas y agronómicas indispensables, realizando estudios para evaluar la respuesta de diferentes materiales genéticos en condiciones de estrés hídrico y temperaturas altas.

Esto contribuiría a amortiguar los efectos del cambio climático que traen consigo modificaciones en los regímenes de lluvia y limitan la producción de alimentos.

4. Hipótesis

Phaseolus vulgaris L. posee mecanismos fisiológicos y morfológicos que le permiten tener un buen desarrollo en las etapas de germinación, emergencia y fase reproductiva en condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Estudiar el efecto del déficit hídrico y alta temperatura sobre la fisiología y morfología de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de invernadero y campo.

5.2 Objetivos específicos

1. Estudiar la respuesta al déficit hídrico y temperaturas en *Phaseolus vulgaris* L. durante la etapa reproductiva (prefloración y floración) en condiciones de invernadero.
2. Determinar el efecto del déficit hídrico, alta temperatura y profundidad de siembra en la germinación y emergencia en *Phaseolus vulgaris* L y sus estructuras en condiciones de campo.

6. Referencias

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*, 14, 5-8.
- Armenta-López, A. R., Lugo-García, G. A., Sánchez-Soto, B. H., Romero-Félix, C. S., Cortez-Mondaca, E., & Nava-Pérez, E. (2021). Resistencia del frijol al ataque del gorgojo pardo *Acanthoscelides obtectus* (Say, 1831)(Coleoptera: Chrysomelidae) en la zona Norte de Sinaloa. *Acta zoológica mexicana*, 37.
- Barrios-Gómez, E. J., López-Castañeda, C., & Kohashi-Shibata, J. (2011). Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo “Flor de Mayo”. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 131-145.
- Barrios-Gómez, E. J., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J., Acosta-Gallegos, J. A., Miranda-Colín, S., Canul Ku, J., & Mayek-Pérez, N. (2012). Comparación de las estructuras morfológicas en raíz e hipocótilo en frijol. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(4), 655-669.
- Castañeda Saucedo, Ma. Claudia, Córdova Téllez, Leobigildo, González Hernández, Víctor A., Delgado Alvarado, Adriana, Santacruz Varela, Amalio, & García de los Santos, Gabino. (2006). RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, RENDIMIENTO E QUALIDADE DE SEMENTES DE FEIJÃO SUBMETIDAS A ESTRÉS HÍDRICO.
- Chaves-Barrantes, N. F., & 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.
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2017b). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 255-271.
- Chaves-Barrantes, N. F., Polanía, J. A., Muñoz-Perea, C. G., Rao, I. M., & Beebe, S. E. (2018). Caracterización fenotípica por resistencia a sequía terminal de germoplasma de frijol común. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 1-18.
- Debouck, D. G. (1984). Morfología de la planta de frijol común. CIAT. Pag 8-
- Domínguez Suárez, A., Darias Rodríguez, R., Martínez Dávalos, Y., & Alfonso Negrín, E. (2019). Tolerancia de variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris*) a condiciones de sequía en campo. *Centro Agrícola*, 46(3), 22-29.

- Domínguez, A. S., Hernández, Y. P., del Castillo, M. S., del Castillo, D. S., & Suárez, R. R. (2014). Efecto del estrés hídrico sobre la germinación de genotipos de frijol común en condiciones experimentales de sequía. *Avanzada Científica*, 17(1), 53-67.
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89), 193-219.
- Guamán Guamán, R. N., Desiderio Vera, T. X., Villavicencio Abril, Á. F., Ulloa Cortázar, S. M., & Romero Salguero, E. J. (2020). Adaptabilidad de cuatro variedades de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) en la parroquia Luz de América-Ecuador. *Siembra*, 7(1), 70-79.
- García-Rodríguez, J. C., Orozco, A. M., Moreno, N. M., Izquierdo, S. C., & Luciano, G. A. (2016). Resistencia de la soya [*Glycine max.*(L.) Merr.] al estrés por calor en estado de plántula. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 4(1), 165-175.
- González Obando, R., Cárdenas Henao, H., & Marín-Londoño, O. A. (2021). Efecto de la temperatura en la expresión fenotípica de caracteres de las manchas costales de *Nyssorhynchus triannulatus* (Diptera: Culicidae: Anophelinae). *Revista Colombiana de Entomología*, 47(1).
- Huerta-Lara, M., Reyes-López, D., Bautista-Calles, J., Hernández-Zepeda, J. S., Parraguirre-Lezama, J. F., & Romero-Arenas, O. (2021). Supervivencia y rendimiento de variedades de frijol con resistencia horizontal a estrés hídrico en la Sierra Nororiental de Puebla. *Nova scientia*, 13(27).
- Jarma Orozco, A., Cardona Ayala, C., & Araméndiz Tatis, H. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63-76.
- Jiménez, J. D. L. C., Moreno, L. P., & Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 96-109.
- Kaushal, N., Bhandari, K., Siddique, KHM, Nayyar, H. y Tejada Moral, M. (2016). Los cultivos alimentarios enfrentan temperaturas crecientes: una descripción general de las respuestas, los mecanismos de adaptación y los enfoques para mejorar la tolerancia al calor. *Alimentación y agricultura convincentes*, 2 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1134380>
- Florido Bacallao, M., & Bao Fundora, L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos tropicales*, 35(3), 70-88.

- López Feldman, A. J., & Hernández Cortés, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459–496. <https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Licea, G. R., Salazar, J. A. G., Rebollar, S., & Contreras, A. C. C. (2010). Preferencias del consumidor de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México: factores y características que influyen en la decisión de compra diferenciada por tipo y variedad. *Paradigma económico*, 2(1), 121-145.
- Liu, Y., Li, J., Zhu, Y., Jones, A., Rose, R. J., & Song, Y. (2019). Heat stress in legume seed setting: effects, causes, and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, 10, 938. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00938>
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J. M., & Pinzón-López, L. L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 343-353.
- Maqueira-López, L. A., Roján-Herrera, O., Solano-Flores, J., & Milagros-Santana, I. (2021). Germinación de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a diferentes temperaturas. *Cultivos Tropicales*, 42(2).
- Méndez Espinoza, C., & Vallejo Reyna, M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(56), 33-64.
- Mendoza R, M. F., Veitía, N., Martirena-Ramírez, A., Rojas, L. E., Torres, D., Hernández, S., & Rivero, L. (2020). Respuesta diferencial de tres cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. al estrés hídrico in vitro inducido por PEG-6000. *Biotecnología Vegetal*, 20(4), 351-359.
- Montero-Tavera, V., Gutiérrez-Benicio, G. M., Mireles-Arriaga, A. I., Aguirre-Mancilla, C. L., Acosta-Gallegos, J. A., & Ruiz-Nieto, J. E. (2019). Efectos fisiológicos del estrés hídrico en variedades de frijol tolerantes a la sequía. *Acta Universitaria* 29, e1816. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.1816>
- Moreno, F., & Patricia, L. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía colombiana*, 27(2), 179-191.
- Morales Rivera, A., López Castañeda, C., Kohashi Shibata, J., Miranda Colín, S., & García Esteva, A. (2015). Comparación de los componentes del rendimiento en variedades de frijol en condiciones de acidez y humedad residual del suelo en el sur de Veracruz. *Terra Latinoamericana*, 33(4), 309-319.

- Olivera Villarroel, S. A. Z. C. H. A., & Sosa Nuñez, G. U. S. T. A. V. O. (2022). Libro: Impactos del cambio climático: una visión desde México. Pag. 209-216
- Pedroza Sandoval, A. Trejo, C, R y Chávez, R, J, A. (2013). Tolerancia al Estrés Hídrico y Fitosanitario Mediante Indicadores Agronómicos y Fisiológicos en Diferentes Variedades de Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31(2), 91-104.
- Pumalpa Meneses, D., Cantaro Segura, H., Estrada Cañari, R., & Huaranga Joaquín, A. (2020). Caracterización Fenotípica y Agronómica de líneas avanzadas del fríjol voluble (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a virus en Perú. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(1), 7-20.
- Reed, R. C., Bradford, K. J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*, 128(6), 450-459. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>
- Rodríguez, J. R. R., Salinas, E. L., & Valle, O. H. T. (2014). Efecto del déficit hídrico en el rendimiento de frijol negro en el norte de Veracruz, México. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(1), 183-187.
- Rosas, J. C. (2011). Contribuciones del programa de investigaciones en frijol en Centro América y El Caribe. *Ceiba*, 52(1), 65-73.
- Rosabal Ayan, L., Martínez González, L., Reyes Guerrero, Y., Dell'Amico Rodríguez, J., & Núñez Vázquez, M. (2014). Aspectos fisiológicos, bioquímicos y expresión de genes en condiciones de déficit hídrico. Influencia en el proceso de germinación. *Cultivos Tropicales*, 35(3), 24-35.
- Ruiz-Sánchez, M., Muñoz-Hernández, Y., Rodríguez-Pérez, R., Santana-Baños, Y., Mesa-Sotolongo, S., Encalada-Córdova, M. E., & Florido-Bacallao, R. (2023). Eficiencia fisiológica de la planta de frijol ante un déficit hídrico. *Cultivos Tropicales*, 44(1), cu-id.
- Ruscitti, M. F., Arango, M. C., Ronco, M. G., Peluso, O., & Beltrano, J. (2007). Efecto del estrés hídrico simulado y la inoculación con esporas de *Glomus mosseae* sobre el crecimiento y la partición de biomasa en avena. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 135-143.
- Sanabrá, K. M., & Lazo, H. O. (2018). Aclimatación a la alta temperatura y tolerancia al calor (TL50) en 6 variedades de *Chenopodium quinoa*. *Revista peruana de biología*, 25(2), 147-152.

- Sita K, Sehgal A, HanumanthaRao B, Nair RM, Vara Prasad PV, Kumar S, Gaur PM, Farooq M, Siddique KHM, Varshney RK and Nayyar H (2017) Food Legumes and Rising Temperatures: Effects, Adaptive Functional Mechanisms Specific to Reproductive Growth Stage and Strategies to Improve Heat Tolerance. *Front. Plant Sci.* 8:1658. DOI: 10.3389/fpls.2017.01658
- Soukup, J. (1970). *Genera peruviana. Raymondiana* 3, 5-97.
- Sharma, L., Priya, M., Bindumadhava, H., Nair, R. M., & Nayyar, H. (2016). Influence of high temperature stress on growth, phenology and yield performance of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] under managed growth conditions. *Scientia Horticulturae*, 213, 379–391. doi:10.1016/j.scienta.2016.10.033
- Siddiqui, M. H., Al-Khaishany, M. Y., Al-Qutami, M. A., Al-Whaibi, M. H., Grover, A., Ali, H. M., & Al-Wahibi, M. S. (2015). Morphological and physiological characterization of different genotypes of faba bean under heat stress. *Saudi journal of biological sciences*, 22(5), 656-663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.06.002>
- Tosquy Valle, O. H., López Salinas, E., Esqueda Esquivel, V. A., Rodríguez Rodríguez, J. R., & Acosta Gallegos, J. A. (2020). Validación de la variedad de frijol Negro Comapa en ambientes tropicales del estado de Veracruz. *Acta universitaria*, 30.
- Ulloa, J. A., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, J. C., & Ulloa Rangel, B. E. (2011). El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. CONACYT.
- Veobides Amador, H., Guridi-Izquierdo, F., & Vázquez-Padrón, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos tropicales*, 39(4), 102-109.

7. Capítulos

7.1 Capítulo 1

Artículo científico

ESTRÉS POR DÉFICIT HÍDRICO Y TEMPERATURAS EN FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) EN CAMPECHE, MÉXICO

Mónica Beatriz **Lopez-Hernandez**¹, Yaritza Yolanda **Quintal-Vargas**¹, Antonio **Villalobos-González**^{2*}, Enrique **Arcocha-Gómez**¹

¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Chiná, Posgrado en Agroecosistemas Sostenibles. Calle 11 s/n entre 22 y 28, Chiná, San Francisco de Campeche, Campeche, México. C.P 24520.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Edzná. Carretera Campeche-Poxyaxum km 15.5, Campeche, México. C.P 24520.

***Autor para correspondencia:** antonio.villalobos@colpos.mx

RESUMEN

El estrés por déficit hídrico y altas temperaturas es una amenaza progresiva y especialmente en las áreas agrícolas donde se cultiva frijol, tales como el estado de Campeche, México. El objetivo fue estudiar la respuesta al estrés hídrico y temperaturas (°C) en frijol durante la etapa reproductiva (prefloración y floración) en condiciones de invernadero. El estudio se llevó a cabo en primavera-verano 2022 en las instalaciones del invernadero del Tecnológico de México, Campus Chiná, Campeche, México. El déficit hídrico consistió en la suspensión del riego a los 39 a 65 dds y un tratamiento testigo (sin suspensión de riego). Se utilizaron cuatro variedades de frijol: Peruano, Bayo, Sangre Maya y San Luis. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones para ambos factores de humedad. El estrés hídrico y las altas temperaturas durante la etapa de reproductiva (prefloración y floración) del cultivo redujo drásticamente el crecimiento y desarrollo del frijol, que resulto en una variación de la transpiración y temperatura del dosel. Asimismo, una reducción del número de trifolios, botones florales, vainas y producción de biomasa seca total entre los genotipos de frijol. Las variedades Sangre Maya y San Luis presentaron menor efecto del estrés hídrico y altas temperaturas, al obtener mayor regulación de la transpiración y temperatura del dosel, y obtener mayor altura de planta,

biomasa seca total y número de trifolios, botones y vainas por planta. Se obtuvo una fuerte asociación entre la altura de planta-biomasa seca total, número de trifolios y vainas por planta entre los genotipos.

INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo tradicional de América Latina que se produce y consume en el país de México (Ramírez-Jaspeado *et al.*, 2020). En la región del Trópico y el Pacífico norte del país, algunos agricultores optan por los frijoles negros pequeños y opacos y los frijoles de tipo peruano, respectivamente (Benítez *et al.*, 2019). En el caso de la península de Yucatán los agricultores emplean principalmente genotipos nativos o criollos y en menor medida de variedades mejoradas con ventajas agronómicas y de calidad (León-Rojas *et al.*, 2019).

Actualmente la producción del frijol se ve afectada por el cambio climático que es una amenaza progresiva y especialmente en las regiones menos desarrolladas (Romero-Félix *et al.*, 2021). Entre estas amenazas se encuentran las sequías y las altas temperaturas del aire (Latorre *et al.*, 2023). La gravedad de la sequía (Seleiman *et al.*, 2021) y el estrés calórico (Tene *et al.*, 2023) se define por la frecuencia, duración e intensidad del estrés y por la fase de desarrollo del cultivo en la que se produce.

En este sentido, en el estado de Campeche estas condiciones son perjudiciales para el cultivo de frijol ya que presenta temperaturas máximas en promedio de 34.2 °C y precipitaciones máximas de 122.6 mm (CONAGUA, 2023). La sequía en las primeras etapas del frijol suele afectar el alargamiento y el tamaño de las hojas (Montero-Tavera *et al.*, 2019). En la fase reproductiva disminuye el rendimiento en mayor proporción que cuando solo afecta la fase vegetativa (Flores-Pacheco *et al.*, 2019). Llevando a producir modificaciones en los indicadores morfológicos, esto dependiendo de la intensidad del estrés hídrico y la tolerancia del genotipo (Hernández *et al.*, 2019).

Algunas de estas modificaciones se consideran respuestas metabólicas que son mecanismos de adaptación al déficit hídrico (Hernández-Figueroa *et al.*, 2022); al destacar por su correlación positiva con la tolerancia a la sequía, la longitud de las raíces y la asociación con la producción de biomasa (Lépiz-Ildelfonso *et al.*, 2018). Sin embargo, otro problema asociado a la reducción del rendimiento del frijol son las altas temperaturas del aire que afectan los diferentes procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas (Maqueira-López *et al.*, 2021); la temperatura alta puede reducir la tasa de fotosíntesis (Chávez-Barrantes y Gutiérrez-

Soto, 2017). También puede alterar el tiempo de floración, causar a sincronía entre el desarrollo reproductivo masculino y femenino y desencadenar el aborto de brotes, flores y semillas, lo cual conduce a una reducción del rendimiento (Romero-Félix *et al.*, 2018).

La tolerancia al estrés hídrico en el frijol es un carácter complejo, implicando una regulación multigenética, dependiendo del ambiente y varias características morfosiológicas (Cháves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017). En cuanto a las características fisiológicas, fotosintéticas, eficiencia, contenido de clorofila, conductancia estomática, tasa de transpiración, temperatura del dosel y potencial hídrico de la hoja se han relacionado con la tolerancia en frijol común (Fogaça *et al.*, 2023). Sin embargo, los índices de tolerancia a la sequía no se han utilizado ampliamente para recopilar información sobre los rasgos fenotípicos del frijol común (Rai *et al.*, 2020) en el estado de Campeche. En consecuencia, el conocimiento de diferentes métodos o herramientas de fenotipado es importante para reconocer las principales características para los procesos de selección de genotipos tolerantes al déficit hídrico y las altas temperaturas del aire de la región (Rodríguez *et al.*, 2021).

Bajo la hipótesis de que el estrés hídrico junto con las altas temperaturas como factores limitantes que afecta la producción del frijol, especialmente durante la floración y el desarrollo de las vainas, el objetivo de este trabajo fue estudiar la respuesta al déficit hídrico y temperaturas en frijol durante la etapa reproductiva (prefloración y floración) en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El experimento se realizó en el área de invernadero, que presentaba una cubierta de polietileno (plástico lechoso 30% sombra) a una altura de 4 m del Tecnológico de México Campus Chiná, localizado en Calle 11 S/N entre 22 y 28, Chiná, Campeche, México (19° 46' 15" N, 91° 29' 41" W y 20 msnm) en el ciclo primavera-verano 2022. La localidad de Chiná tiene un clima del tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una precipitación media de 1600 mm y una temperatura media anual de 27 °C con temperaturas máximas mayor a 30 °C y la mínima de 18 °C (CONAGUA, 2023).

Establecimiento experimental

El experimento consistió de cuatro genotipos de frijol, que agrupo a tres variedades comerciales: frijol Peruano que presenta un tipo de crecimiento uno (TC: I), San luis (TC: III) y Bayo (TC: III). y una nativa denominada en la región como sangre maya (TC: IV) proveniente del Laboratorio de Agricultura Agroecológica Orgánica Sustentable (LAAOS) del TECNOM Campus Chiná.

Previo al experimento se realizó una prueba de germinación (mayo 2022) de acuerdo a la Asociación Internacional de Ensayo de Semillas (ISTA, 2023). Posterior a la emergencia que ocurrió a los cinco días después de la siembra se utilizó una plántula para trasplantarla a los tubos de PVC con dimensiones de 100 cm de alto y 10 cm de ancho que contenía una bolsa cilíndrica de plástico con las mismas dimensiones, con un sustrato a base de suelo de la región denominado Saklu'um (leptosoles líticos) y arena. En total se utilizó 30 tubos para los tratamientos de humedad riego y sequía, con un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones para ambos factores de humedad. La unidad experimental consistió de una plántula por tubo. Posterior al trasplante en todos los tratamientos de humedad riego y sequía, el sustrato se llevó a capacidad de campo (CC). Este fue determinado mediante el peso inicial (sustrato seco) y la diferencia del peso final (sustrato irrigado) después de 24 h.

Las plantas en condiciones de humedad se mantuvieron con un riego continuo durante todo el ciclo del cultivo. Mientras que las plantas con sequía, se les suspendió el riego en la fase reproductiva del cultivo (FR) a los 39 dds durante 28 días sin llegar al punto de marchitez permanente (PMP), posterior al periodo se realizó un riego de recuperación (RR) a los 65 dds. La cantidad de transpiración (TRA) se determinó al pesar todos los tubos con una báscula digital, modelo I-PCA de la marca Advance® una vez a la semana por un lapso de cuatro semanas en los tratamientos de humedad y sequía.

Manejo fitosanitario

Para el control de insectos pulgones, gusanos, orugas y araña roja, se utilizó una mezcla de ajo, laurel (1 L) y jabón neutro (30 ml) se aplicó de manera foliar cada dos días durante todo el ciclo del cultivo. Para la presencia de cochinilla algodonosa se implementó una mezcla de jabón neutro (20 g) y agua (20 L) y aparte una mezcla de alcohol isopropílico (70 %) y agua (30 %). Durante el ciclo del cultivo se eliminaron malezas de forma manual. No se agregó fertilizante.

Variables evaluadas

La temperatura (T) máxima del aire (T_m °C) se registró todos los días al medio día (12 h) con un termómetro de mercurio de columna, modelo 4902 de la marca Brixco® hasta el final del ciclo fenológico. La transpiración total por planta (T, g de H₂O) se calculó de acuerdo a al sumar la transpiración determinada entre mediciones durante la fase reproductiva de cada planta. La temperatura del dosel (TD, °C) se registró al medio día (12 h) con un termómetro infrarrojo, modelo METTE-500 de la marca Truper® en las dos condiciones hídricas, durante la etapa vegetativa y reproductiva. Durante el ciclo del cultivo se registraron datos de altura de la planta (ALP, cm) con ayuda de un flexómetro (cm) y se contabilizó el total de trifolios (NT). Los números de botones florales (NBF) se determinó a medida que los genotipos presentaron el botón floral. Iniciando este para las primeras variedades

a los 45 dds. El número de vainas (NVA) se empezó a cuantificar a partir de los 97 dds en toda la unidad experimental.

La biomasa seca aérea se determinó al cosechar al finalizar la madurez fisiológica que seguidamente fueron introducidas a una estufa de secado, modelo UNP 400 de la marca MEMMERT® a una temperatura de 70 °C durante 72 h para obtener peso seco.

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos de cada bloque se realizaron análisis de varianza para cada uno de los tratamientos (riego y sequía) y en forma combinada para determinar la significancia de la interacción genotipo por humedad por el procedimiento GLM del programa SAS versión 9.1 para Windows (SAS, 2009). La comparación de medias se realizó mediante la prueba de la diferencia mínima significativa (Tukey) a un nivel de probabilidad de error de 0.05.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

El efecto del estrés hídrico afectó significativamente la expresión de todos los caracteres de frijol (Cuadro 1). Asimismo, esta condición propicia que los genotipos obtuvieran una variación significativa en la temperatura del dosel y transpiración. Sin embargo, con respecto a la interacción genotipo por humedad, no se presentó una interacción positiva $p \leq 0.05$ para altura de planta (ALP), transpiración (TRP) y temperatura del dosel (TD).

Cuadro 1. Resultados del ANOVA de cuadrados medios en caracteres de frijol Peruano, Bayo, San Luis y Sangre Maya en condiciones de sequía y riego durante el ciclo P-V 2022.

FV	GL	TRP	TD	ALP	NTRP	NBF	NVP	PBST
REP	2	0.16 ^{ns}	0.72 ^{ns}	1468.72 ^{ns}	37.04 ^{ns}	18.16 ^{ns}	3.50 ^{ns}	2.93 ^{ns}
HUM	1	19.98 ^{**}	19.44 [*]	593.02 ^{ns}	3360.66 ^{**}	100.04 ^{ns}	5.04 ^{ns}	23.60 [*]
GEN	3	0.59 ^{**}	10.32 [*]	45634.59 ^{**}	3302.66 ^{**}	1547.37 ^{**}	71.15 ^{**}	445.79 ^{**}
GEN*HUM	3	0.02 ^{ns}	5.71 ^{ns}	2130.18 ^{ns}	488.88 ^{**}	596.59 ^{**}	12.04 [*]	36.61 [*]
Error	14	0.07	36.42	1294.97	21.70	24.69	1.35	3.94
Total	23							
C.V. %		29.43	4.07	20.66	12.20	19.51	16.94	12.62

^{ns}: No significativo, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$, TRP: Transpiración (g), TD: Temperatura del dosel (°C), ALP: Altura de planta (cm), NTRP: número de trifolios por planta, NBF: Número de botones florales, NVP: Número de vainas, PBST: Biomasa seca total (g).

Temperatura del aire y contenido de humedad en el suelo

Durante el desarrollo del experimento, en promedio se presentó una temperatura media del aire de 33.5 °C; no obstante, se registró una variación de la temperatura mínima y máxima, que osciló entre 27.6 a 35.2 °C, respectivamente (Figura 1).

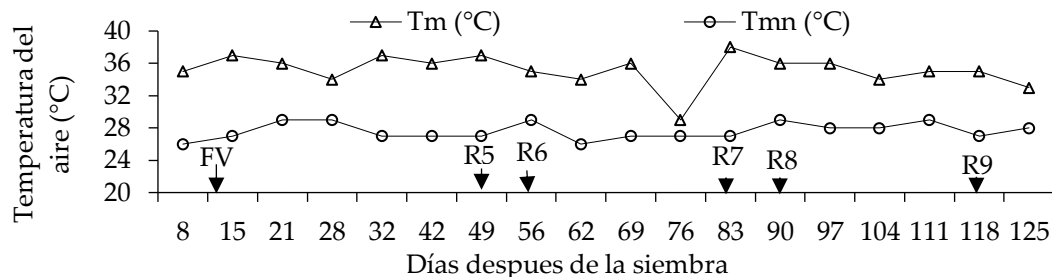


Figura 1. Promedio de la temperatura máxima (Tm °C) y mínima (Tmn °C) semanal durante el ciclo de primavera- verano 2022. FV: fase vegetativa, R5: prefloración, R6: floración, R7: formación de vainas, R8: llenado de vainas, R9: madurez fisiológica.

Durante la etapa reproductiva (R5 a la R9) se registró una temperatura media de 31 °C, con una tendencia a disminuir hacia el final de la floración y aumentando al inicio de la formación de vainas (**Figura 1**). No obstante, se observó que todos los genotipos de frijol, desde el estado de plántula a madurez fisiológica mostraron una variación en su respuesta al riego, estrés hídrico y temperaturas del aire. Sin embargo, esto fue menos evidente cuando las plantas se mantuvieron con valores cercanos a capacidad de campo (CC) (96 % de humedad), condición que contribuyó a reducir el efecto de estrés por altas temperaturas (29 a 38 °C) (Vargas, *et al.*, 2021) en todos los genotipos (**Figuras 2A, 2B y 2C**). Estudios posteriores indican que la temperatura del aire está relacionada con la variación de la temperatura del suelo (Laoye, *et al.*, 2021) y humedad (Tan y Chen, 2017) (**Figura 2A**); es decir, a mayor temperatura del aire, mayores serán los valores del déficit hídrico (Liu, 2024) con base a la humedad del suelo (**Figura 2A**) y genotipo por humedad (**Figuras 2B y 2C**) (Rosales-Serna *et al.*, 2021), por lo que algunos genotipos de frijol son más susceptibles a altas temperaturas (Soltani, *et al.*, 2019; Vargas, *et al.*, 2021) y déficit hídrico (Papathanasiou, *et al.*, 2022).

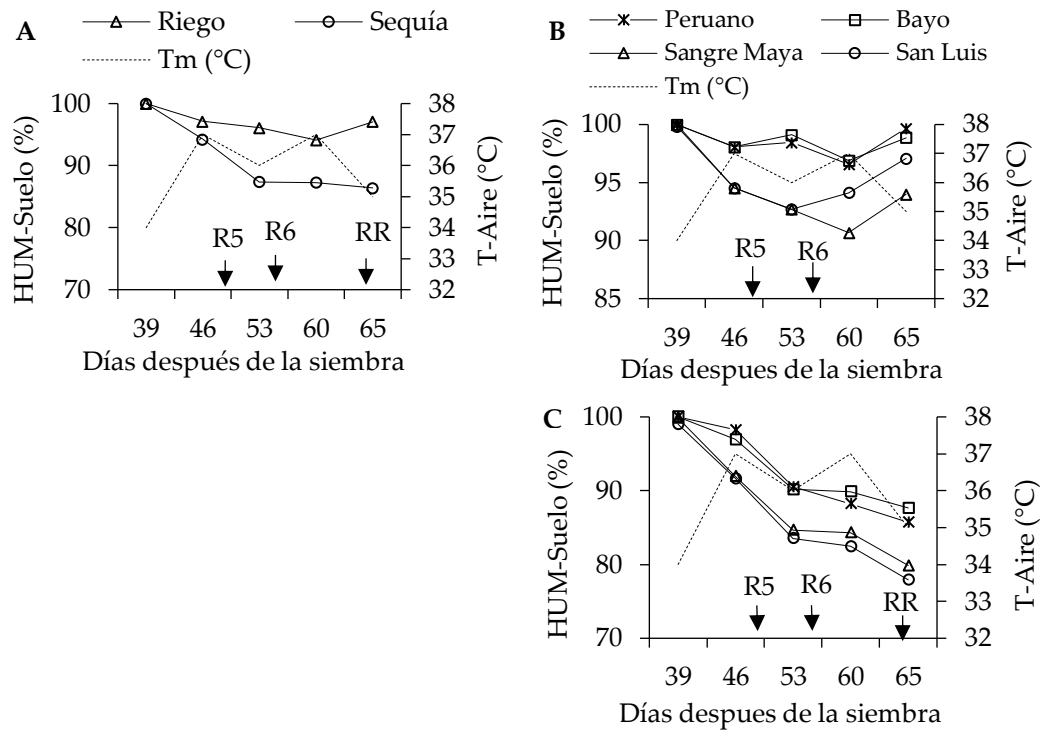


Figura 2. Comportamiento de los genotipos de frijol con base a la humedad del suelo (HUM-Suelo) y temperatura (T) máxima (Tm) del aire en las etapas de prefloración (R5) y floración (R6) durante el ciclo de P-V 2022. RR: riego de recuperación, A: humedad del suelo en riego y sequía, B: Genotipos en riego, C: Genotipos en sequía.

Asimismo, cuando se presentan de forma simultánea el déficit hídrico y altas temperaturas, las repercusiones en la planta de frijol son mayores (Alves-Barros, *et al.*, 2023), tales como en el frijol Peruano, Bayo, San Luis y Sangre Maya, al presentarse una temperatura promedio de 36 °C y un descenso en el porcentaje de humedad en el suelo en la etapa de prefloración y floración de frijol (**Figuras 2B y 2C**). En este contexto, la disminución del déficit hídrico que coincidió con la etapa reproductiva con base a la suspensión del riego a los 39 a los 65 dds y una temperatura promedio entre genotipos de 34 a 37 °C, se observó que el mayor déficit hídrico se presentó en el frijol San Luis con 22 % en comparación con el 12 % que se obtuvo en el frijol Bayo (**Figura 2C**). Estos resultados se asimilan a los observados por Romero-Félix *et al.* (2019), donde las altas temperaturas (25 a 40° C) más un déficit hídrico afectaron de forma negativa el desarrollo y crecimiento de frijol (Kimani *et al.*, 2022) durante la etapa reproductiva, con excepción sobre los observados por Tapia *et al.* (2022) donde no encontraron una relación del efecto del estrés hídrico y las altas temperaturas (40 °C) en la fase reproductiva; sin embargo, Baath *et al.* (2020) ha observado que algunos frijoles prevalecen bajo

estrés hídrico, mientras que otros no pueden sobresalir, tales como la variedad Peruano (**Figura 2C**).

Transpiración

El déficit hídrico (Androcioli *et al.*, 2020) y las altas temperaturas del aire (Tene *et al.*, 2023) afecto la transpiración (Fogaça *et al.*, 2023) de todos los genotipos de frijol en la etapa reproductiva (R5 y R6) (**Figura 3B**), al obtener en promedio valores de entre 1.5 a 1.8 g de H₂O por planta entre genotipos con respecto a las plantas en condiciones de riego, que en promedio presento una transpiración de 0.4 g de H₂O a través del tiempo en los cuatro genotipos (**Figura 3A**). Es importante señalar que, entre genotipos, para ambas condiciones de humedad en promedio la transpiración aumento con base a los días después de la siembra (**Figuras 3A y 3B**); no obstante, los genotipos con un déficit hídrico presentaron mayor transpiración (**Figura 3B**).

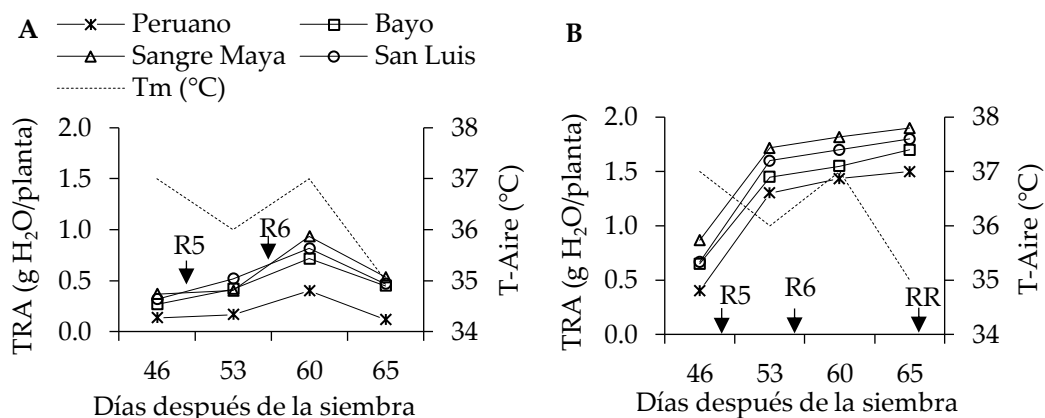


Figura 3. Transpiración (TRA) total por genotipo y temperatura (T) máxima (Tm) del aire con base a riego (A) y sequía (B) en las etapas de prefloración (R5) y floración (R6) durante el ciclo de P-V 2022, Chiná, Campeche. RR: riego de recuperación.

En relación al efecto simultaneo del déficit hídrico y altas temperaturas del aire se observó que la transpiración del frijol Peruano fue inferior ($p \leq 0.05$) con respecto a Sangre Maya durante la etapa reproductiva (R5 y R6) con una deferencia de 55 % a los 46 dds y 23 % a los 53 dds, 22 % a los 60 dds y 21 % a los 65 dds, respectivamente (**Figura 3B**). Por lo que, genotipos con mejor regulación de la transpiración podrían ser una opción para tolerar el estrés por déficit hídricos y calor (Suárez *et al.*, 2020) en ambas condiciones de humedad (**Figuras 3A y 3B**). Polanía *et al.*, (2022), observo efectos similares sobre la transpiración en frijol, en el cual sobresalió el genotipo Tépari con mayor eficiencia de la transpiración que el frijol Bayo Madero y Pinto Saltillo en condiciones de déficit hídrico y altas temperaturas. Igualmente, Polanía *et al.*, (2022) indica que la eficiencia de la transpiración se debe a la apertura

prolongada de los estomas que tienen mayor fijación de carbono acumulando biomasa y al cierre de los estomas al conservar mayor contenido de agua que reduce el crecimiento de la planta (Arruda *et al.*, 2018).

Temperatura del dosel

En riego las plantas de todos los genotipos, en promedio tuvieron menor temperatura del dosel (39 °C) del cultivo (Bhardwaj *et al.*, 2023) que en deficit hidrico (40 °C) (**Figura 4**), y esta se relaciono positivamente ($p \leq 0.05$) con la temperatura del aire en ambos ambientes de humedad del suelo en la etapa reproductiva (R5 y R6); es decir, la temperatura del dosel aumento a medida que la temperatura del aire se incrementó (Nemeskéri y Helyes 2019) durante el periodo de mediciones entre las etapas R5 (39 y 46 dds) y R6 (53, 60 y 65 dds), sobre todo en el ambiente de sequia, a traves de los genotipos Sangre Maya (**Figura 4C**) y San Luis (**Figura 4D**), donde las plantas sufrieron niveles más altos de estrés hidrico y que se asimilaran a los observados por Pohlmann *et al.* (2022) en las plantas de frijol Garapiá, Triunfo, BRS-FC104 y doce genotipos de frijol comun (Daina *et al.*, 2018) en el cual, el deficit hidrico en el suelo se relaciono positivamente con una mayor temperatura del dosel. Sin embargo, existen genotipos con mayor depresion de la temperatura del dosel en condiciones de altas temperaturas y estrés por sequia obteniendo asi una mayor disponibilidad del contenido hidrico del suelo (Sofi *et al.*, 2021). Por lo que se ha demostrado que el enfriamiento transpiracional es un mecanismo importante para evitar el calor en muchos cultivos, tales como el frijol Peruano (**Figura 4A**) y Bayo (**Figura 4B**), que sobresalieron con mayor depresion de la temperatura del dosel (Soureshjani *et al.*, 2019) y las características de enfriamiento de las hojas se han utilizado para mejorar la tolerancia tanto a la sequía como al calor (Deva *et al.*, 2020).

En este contexto, se ha sugerido que el enfriamiento transpiracional mejorado puede ser un rasgo útil para identificar genotipos (Chaudhary *et al.*, 2020) de frijol con la plasticidad térmica necesaria para adaptarse al cambio climático (Mohammed *et al.*, 2024).

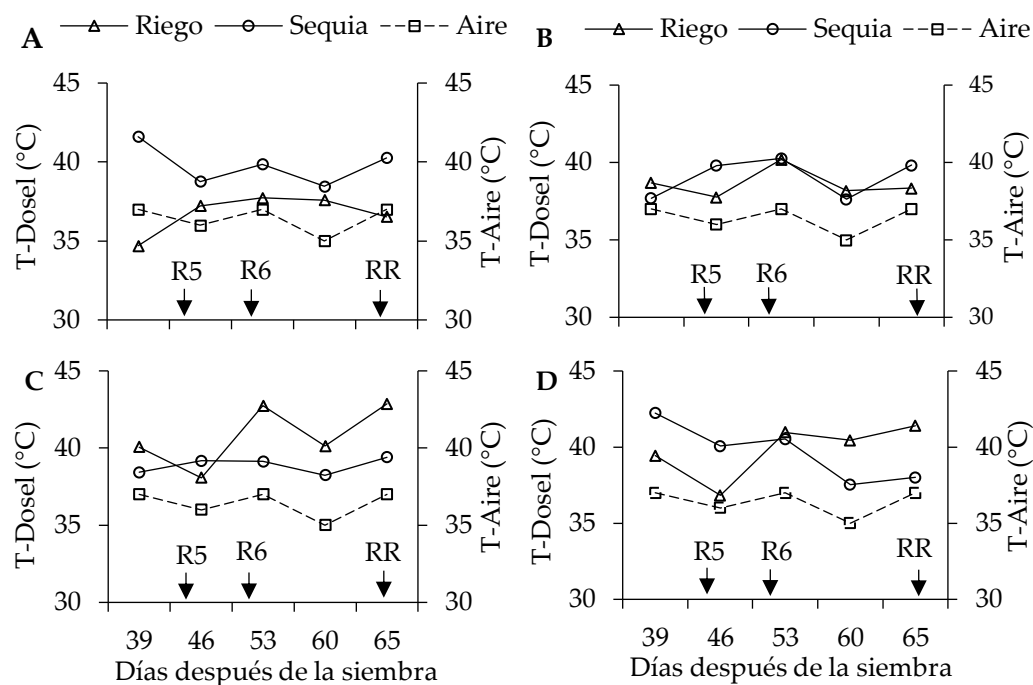


Figura 4. Temperatura del dosel (T-Dosel) de los genotipos de frijol con base a la etapa de prefloración (R5) y floración (R6) en condiciones de riego y sequía. RR: riego de recuperación, A: frijol Peruano, B: frijol Bayo, C: frijol Sangre Maya y D: frijol San Luis.

Altura de la planta

El déficit hídrico y estrés por calor (29 a 38 °C) indujo ($p \leq 0.05$) cambios fisiológicos (Admasu *et al.*, 2019) durante el crecimiento y desarrollo de las plantas, alterando la altura de la planta (ALP, cm) de frijol de todos los genotipos evaluados (**Figuras 5A y 5B**). Por lo que, al aplicar el estrés hídrico a los 39 a 65 dds, se presentó en promedio una reducción del déficit hídrico del 18 %, con una disminución de la ALT en un 8 % del frijol Sangre Maya con excepción de los demás genotipos (**Figura 5C**), donde la ALT fue mayor bajo condiciones de estrés hídrico con una diferencia superior del 15 % para frijol Peruano, 19 % para Bayo y 31 % con respecto a frijol San Luis. No obstante, en riego, entre genotipos de menor (frijol peruano) y mayor (Sangre Maya) ALP total se presentó una variación de alrededor del 82 % (**Figura 5D**). Mientras que, en sequía, sobresalió el frijol San Luis, con una diferencia superior del 20 % con respecto a Sangre Maya, 25 % para Bayo y con 80 % sobre el frijol Peruano (**Figura 5D**). Estudios similares, indican que al descender a un 60 % el déficit hídrico en el suelo ocasionó una variación en la ALP de la variedad Canario Centenario (Pérez-Iriarte *et al.*, 2018). Mientras que al evaluar frijoles tolerantes e intolerantes al estrés hídrico y por calor, los genotipos que sobresalieron en ALP fueron los que permanecieron bajo déficit hídrico (Rose *et al.*, 2023). Así mismo, Pohlmann *et al.* (2021) observó que al someter a déficit hídrico y riego al frijol: Triunfo, Pinto

Garapia y BRS.FC104 en la etapa de prefloración (R5), la mayor ALP se obtuvo en el régimen de riego.

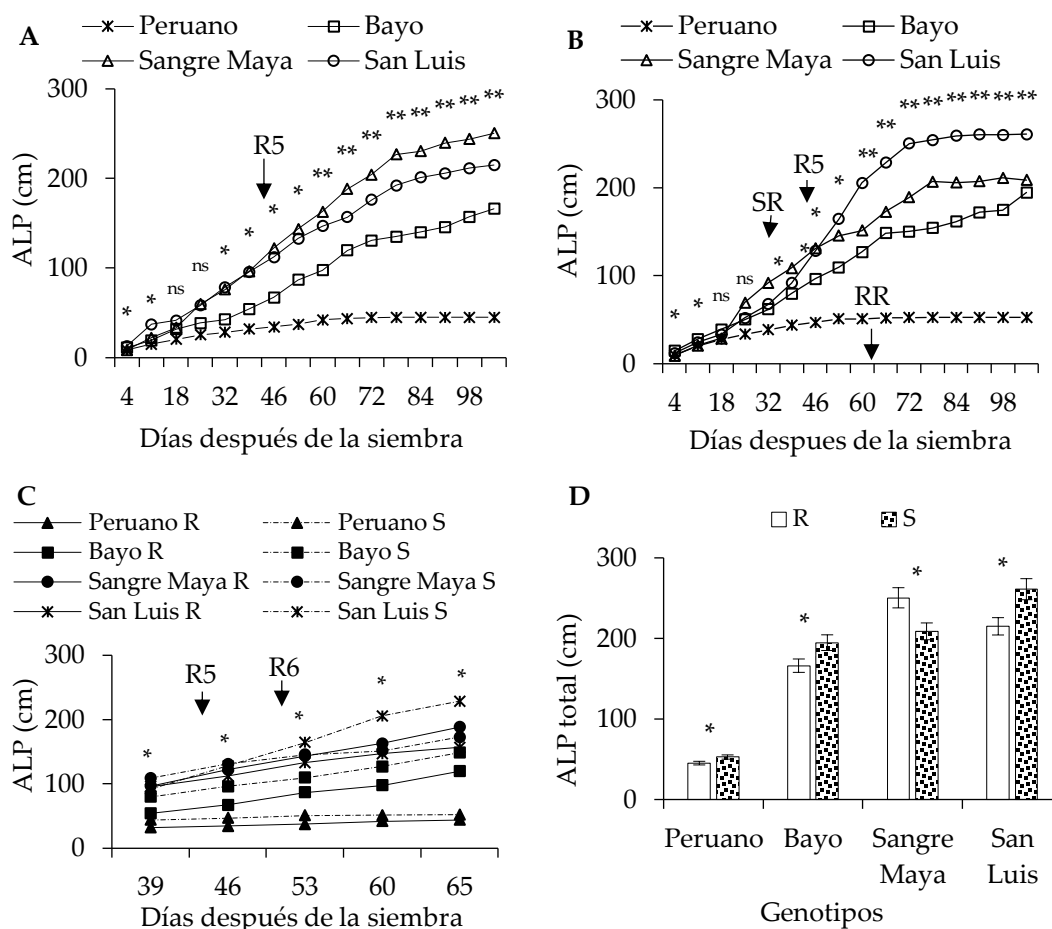


Figura 5. Altura de planta (ALP, cm) de los genotipos de frijol con base a la etapa de prefloración (R5) y floración (R6) en condiciones de riego (R) y sequía (S), SR: suspensión del riego, RR: riego de recuperación, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$. A: genotipos en riego, B: genotipos en sequía, D: altura de planta con base a días con y sin suspensión de riego, C: altura total de planta en riego y sequía. Las barras verticales muestran el error estándar.

Número de Trifolios, Botones Florales y Vainas

Se obtuvo una variación en el número de trifolios (NTRP) (**Figuras 6A y 6B**), botones florales (NBF) (**Figuras 7A y 7b**) y vainas (NVP) por planta $p \leq 0.05$ (**Figuras 8A y 8B**) con base al déficit hídrico y a la temperatura (29 a 38 °C) durante el ciclo del cultivo. Asimismo, ambos efectos (sequía y temperatura) mostraron mayor repercusión en la variedad de frijol San Luis, al disminuir en un 48 % el NTRP cuando las plantas se mantuvieron sin riego (39 a 65 dds) (**Figura 6C**) y una 45 % al finalizar el ciclo del cultivo con respecto al frijol Peruano (17 %), Sangre

Maya (36 %) y Bayo (37 %). No obstante, el frijol Peruano obtuvo el menor NTRP en ambas condiciones de humedad (**Figura 6D**). Guerrero-Domínguez *et al.* (2023) al disminuir el 50 % la capacidad de campo (CC) en la etapa reproductiva del frijol negro Triunfo 70 se redujo el área foliar, tales como el NTRP, senescencia y abscisión de las hojas lo que afecta la producción de materia seca y el rendimiento del cultivo (Kimani *et al.*, 2022).

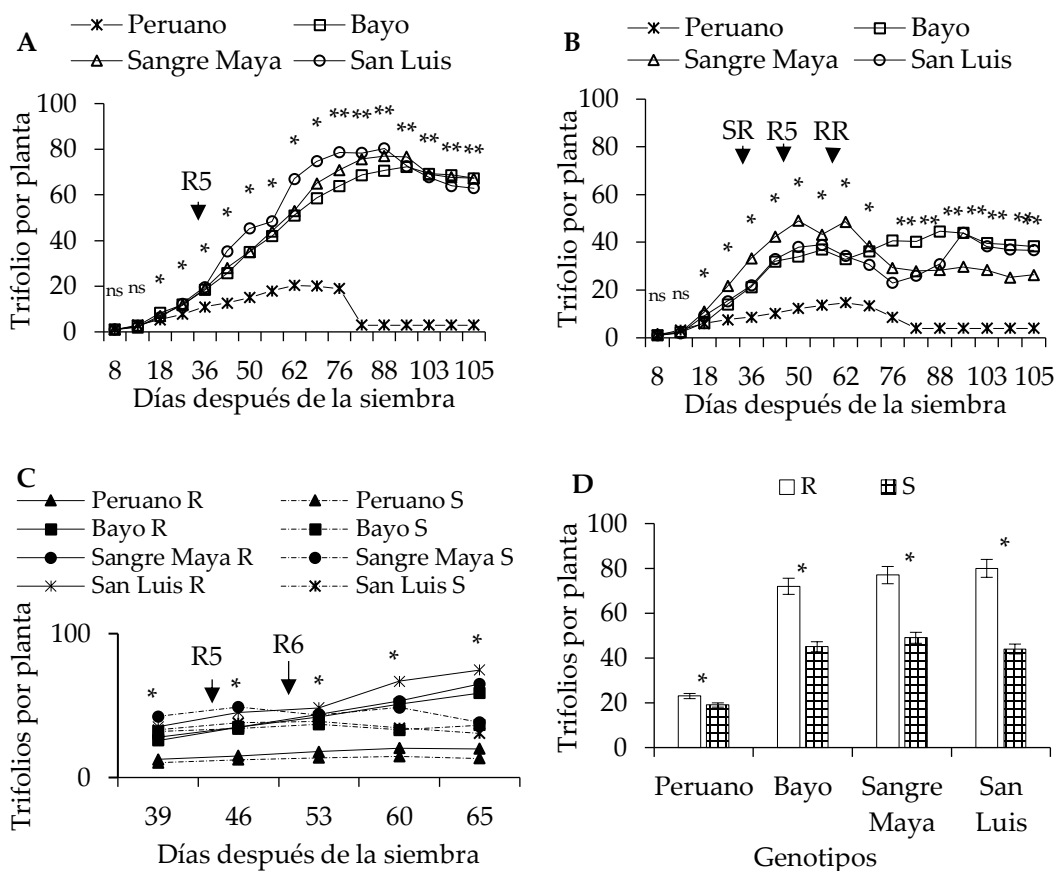


Figura 6. Número de trifolios de los genotipos de frijol con base a la etapa de prefloración (R5) y floración (R6) en condiciones de riego (R) y sequía (S), SR: suspensión del riego, RR: riego de recuperación, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$. A: genotipos en riego, B: genotipos en sequía, C: total de trifolios por planta en riego y sequía, D: número de trifolios con base a días con y sin suspensión de riego. Las barras verticales muestran el error estándar.

Las deficiencias hídricas ocasionadas a los 39 a 65 dds y las altas temperaturas (38 °C) (**Figura 7C**) fueron más severas $p \leq 0.05$ en el frijol San Luis y Bayo, al reducir el 100 % el NBF; sin embargo, la variedad San Luis mostró una menor respuesta al riego de recuperación para el NBF (**Figuras 7A y 7B**), con una diferencia inferior del 77 % con respecto

a plantas con riego al finalizar el ciclo del cultivo (**Figura 7D**). No obstante, el frijol Bayo obtuvo una reducción total del NBF en riego, que probablemente se debió al efecto de las altas temperaturas (38 °C) (Polanía *et al.*, 2022) durante la atapa de floración e inicio de botones florales (**Figura 7C**). Sofi *et al.* (2021) indica que es común observar el aborto de botones florales y una disminución del número (NVP) y llenado de vainas cuando se presenta un déficit hídrico en la etapa reproductiva de frijol, como lo obtenido en el frijol Bayo y Peruano (**Figura 8A**). Asimismo, cuando se presentan de forma simultánea el déficit hídrico y altas temperaturas, las repercusiones son más severas en el aborto (Suárez *et al.*, 2020) y cantidad de NBP en riego y sequía (Kimani *et al.*, 2022), tales como en el frijol Bayo (**Figuras 8A y 8B**) en comparación con el frijol Sangre Maya, Canario Centenario (Pérez-Iriarte *et al.*, 2021) y Flor de Mayo Noura (Romero-Félix *et al.*, 2018) que presentaron un mayor NBP.

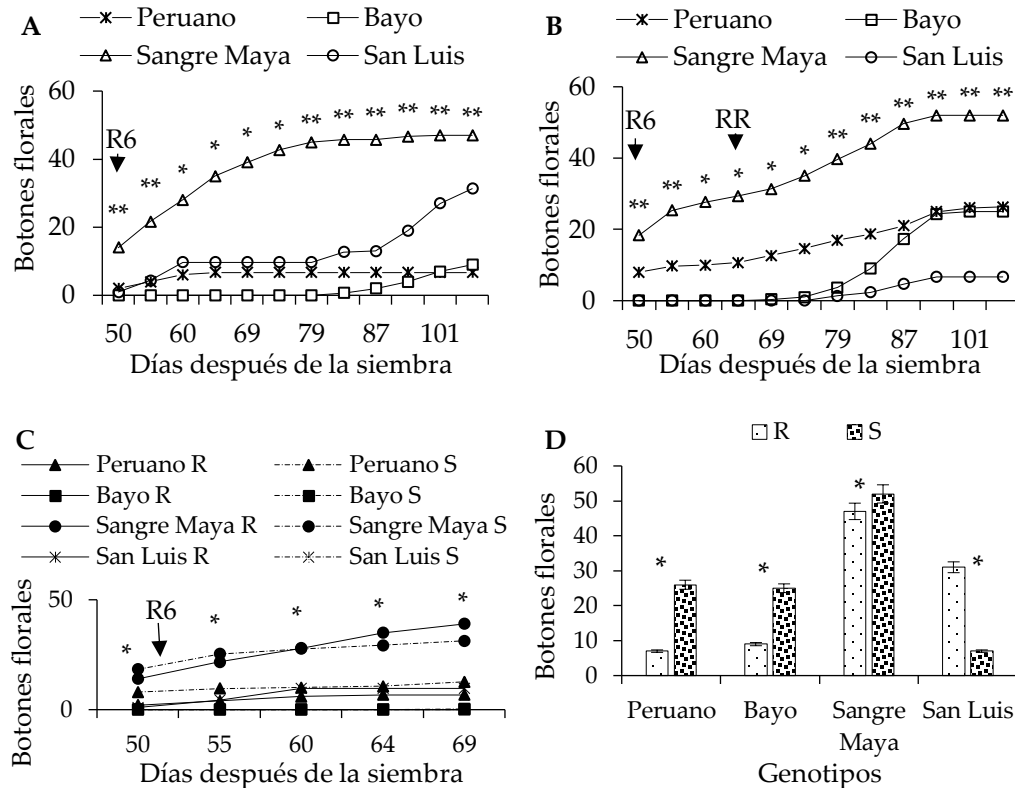


Figura 7. Número de botones florales de los genotipos de frijol con base a la etapa de prefloración (R5) y floración (R6) en condiciones de riego (R) y sequía (S), SR: suspensión del riego, RR: riego de recuperación, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$. A: genotipos en riego, B: genotipos en sequía, C: total de botones florales por planta en riego y sequía, D: número de botones florales con base a días con y sin suspensión de riego. Las barras verticales muestran el error estándar.

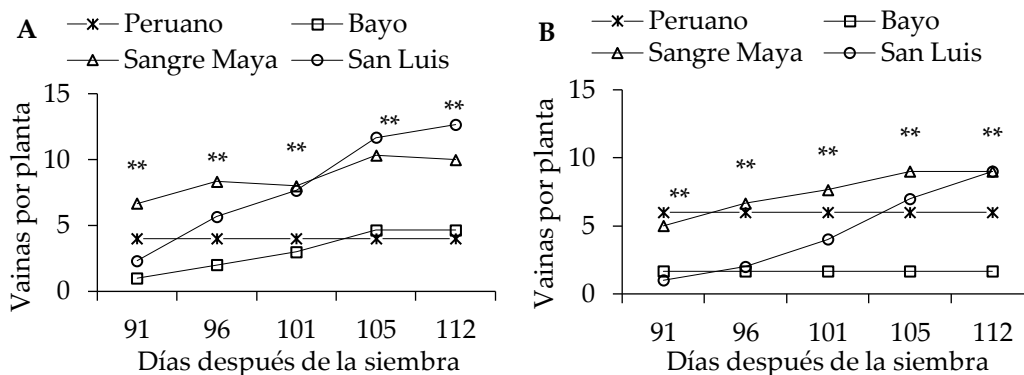


Figura 8. Número de vainas de los genotipos de frijol con base a la etapa de prefloración (R5) y floración (R6) en condiciones de riego (R) y sequía (S), SR: suspensión del riego, RR: riego de recuperación, *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$. A: genotipos en riego, B: genotipos en sequía

Biomasa seca total

La producción de biomasa seca total (PBST), tales como el frijol Sangre Maya se vio afectada $p \leq 0.05$ por el déficit hídrico y a las altas temperaturas (**Figura 8**). Asimismo, los demás genotipos en condiciones de déficit hídrico presentaron mayor PBST que en riego. Donde la variedad Peruano obtuvo la menor PBST en riego y sequía, con una diferencia inferior del 84 % con respecto al frijol Bayo y San Luis, y un 88 % para Sangre Maya en Riego. Mientras que, en sequía, se presentó una diferencia inferior del 84 % para el frijol Sangre Maya, 87 % para Bayo y con 88 % para el frijol San Luis. Polanía *et al.* (2022), indican que algunas variedades resistentes a la sequía terminal presentan mayor capacidad de PBST que otros, tales como el frijol Pinto Saltillo, San Luis, Bayo y Sangre Maya (**Figura 8**) en comparación con el genotipo susceptible Bayo Madero. Esto puede estar relacionado con mecanismos implicados en el equilibrio del crecimiento bajo estrés y con una movilización más eficiente de fotoasimilados (Suárez *et al.*, 2020). Sin embargo, algunos estudios mencionan que una producción mayor de biomasa ocasiona una baja demanda de vainas e índice de cosecha en materiales sensibles al estrés hídrico y altas temperaturas, tales como el frijol Flor de mayo, Pinto (Anaya-López *et al.*, 2022) y Peruano (**Figura 8**).

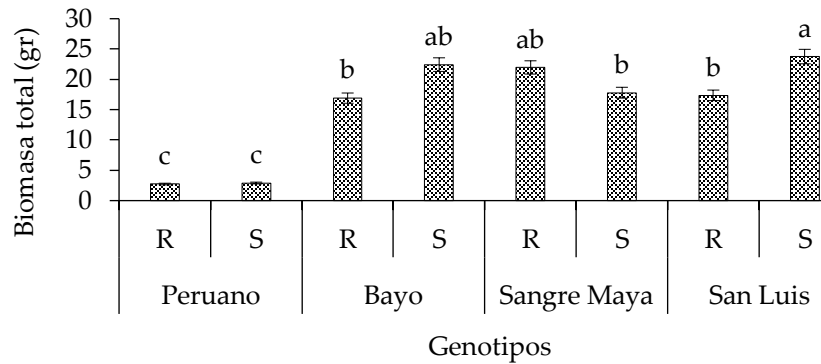


Figura 8. Biomasa total seca (gr) de los genotipos de frijol con base de riego (R) y sequia (S). Letras iguales denotan que no hay diferencia significativa ($p \leq 0.05$). Las barras verticales muestran el error estándar.

Correlación

Todas las variables se correlacionaron entre sí de manera positiva $p \leq 0.05$, con excepción del número de botones florales (NBF) que no se asoció con prácticamente ninguna de las variables analizadas (Cuadro 2). Las mayores correlaciones fueron entre ALP-PBST (0.71**), ALP-NTRP (0.67*), NTRP-PBST (0.50*), ALP-NVP (0.42*) (Cuadro 2). Es decir, a mayor altura y biomasa en la planta de frijol (Costa *et al.*, 2023), contribuyó positivamente en la mayor NTRP y NVP; que, para el presente trabajo, esta asociación hizo sobresalir a las variedades Sam Luis y Sangre Maya, para ambas condiciones de humedad (Cuadro 2 y Figuras 5D, 6D, 7D, 7E, 7F y 8). Padilla *et al.* (2019) indica que estas correlaciones se ven afectadas por el contenido hídrico (Padilla *et al.*, 2019) y condiciones de las temperaturas, ya que el crecimiento de los órganos vegetativos y reproductivos se traslapa y éstos compiten entre sí hasta que las estructuras, tales como las hojas, botones y vainas ejercen una demanda alta, sin embargo, esto difiere entre genotipos de frijol (Anaya-López *et al.*, 2022).

Cuadro 2. Coeficiente de correlación entre las diferentes condiciones hídricas (riego y sequia) en cuatro genotipos de frijol.

	ALP	NBF	NVP	NTRP
NBF	0.30 ^{ns}			
NVP	0.42*	0.36 ^{ns}		
NTRP	0.67*	0.18 ^{ns}	0.32 ^{ns}	
PBST	0.71**	0.24 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.50*

** $p \leq 0.01$; * $p \leq 0.05$, ^{ns}: no significativo; ALP: altura (cm) de planta; NBF: número de botones florales por planta; NVA: número de vainas por planta; NTRP: número de trifolios por planta; PBST: biomasa seca total (g) aérea.

CONCLUSIÓN

El estrés hídrico y las altas temperaturas durante la etapa de reproductiva del cultivo (prefloración y floración) redujo drásticamente el crecimiento y desarrollo del frijol y resultó en una variación de la transpiración y temperatura del dosel. Asimismo, una reducción del número de trifolios, botones florales, vainas y producción de biomasa total de los genotipos de frijol. Las variedades Sangre Maya y San Luis presentaron menor efecto del estrés hídrico y altas temperaturas, al obtener mayor regulación de la transpiración y temperatura del dosel, y obtener mayor altura de planta, biomasa seca total y número de trifolios, botones y vainas por planta. Se obtuvo una fuerte asociación entre la altura de planta-biomasa seca total, número de trifolios y vainas por planta entre los genotipos.

REFERENCIAS

- Admasu R, Asefa A, Tadesse M. 2019. Effect of growth stage moisture stress on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield and water productivity at Jimma, Ethiopia. *International Journal of Environmental Science and Natural Resources* 16 (1): 555929. <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2019.16.555929>
- Alves BJR, Machado GMJ, Lima SW, De-Melo NF, Angelotti F. 2023. Temperatura: un determinante climático importante de la producción de caupí. *Acta Scientiarum* 45: e56812. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56812>
- Anaya-López JL, Rojas-Tovar LM, Cisneros-López HC, Acosta-Gallegos JA. 2022. Rendimiento e índice de cosecha de germoplasma de frijol pinto y flor de mayo bajo estrés por temperatura alta. *Revista Fitotecnia Mexicana* 45 (1): 33-33. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.33>
- Androcioli LG, Zeffa DM, Soares AD, Pires TJ, Moda-Cirino V. 2020. Effect of Water Deficit on Morphoagronomic and Physiological Traits of Common Bean Genotypes with Contrasting Drought Tolerance. *Water* 12: 217. <https://doi.org/10.3390/w12010217>
- Arruda IM, Moda-Cirino V, Koltun A, dos Santos OJAP, Moreira RS, Moreira AFP, Gonçalves, LSA. 2018. Physiological, biochemical and morphoagronomic characterization of drought-tolerant and drought-sensitive bean genotypes under water stress. *Physiol Mol Biol Plants* 24 (6): 1059–1067. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0555-y>
- Baath GS, Rocateli AC, Kakani VG, Singh H, Northup BK, Gowda PH, Katta JR. 2020. Growth and physiological responses of three warm-season legumes to water stress. *Scientific reports* 10 (1): 12233. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69209-2>
- Benítez GA, Díaz EGV, Rivera RC, Cruz-Crespo E, Gálvez RJ. 2019. Germinación de cultivares de frijol con características físicas contrastantes bajo condiciones de estrés osmótico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10 (2): 239-251. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.720>

- Bhardwaj R, Lone JK, Pandey R, Mondal N, Dhandapani R, Kumar MS, Khan S, Gayacharan. 2023. Insights into morphological and physio-biochemical adaptive responses in mungbean (*Vigna radiata* L.) under heat stress. *Frontiers in Genetics* 14: 1206451. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1206451>
- Chaudhary S, Devi P, Bhardwaj A, Chand JU, Dev SK, Vara PPV, Siddique KHM, Bindumadhava H, Kumar S, Nayyar H. Identification and Characterization of Contrasting Genotypes/Cultivars for Developing Heat Tolerance in Agricultural Crops: Current Status and Prospects. *Frontiers Plant Science*. 11: 587264. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.587264>
- Chaves-Barrantes NF y Gutiérrez-Soto MV. 2017. Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana* 28 (1): 255. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21904>
- CONAGUA (Comisión nacional del agua). 2023. Servicio meteorológico nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> (Recuperado: febrero 2024).
- Costa BTO, Ardigueri M, Castro SGF, Junqueira FMA, Flausino GJR, Dos-Santos AF. Performance of Vegetation Indices to Estimate Green Biomass Accumulation in Common Bean. *AgriEngineering* 2023, 5, 840–854. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5020052>
- Daina A da S, Raquel L de M dos R, Joao GRG, Sergio AMC, Alisson FC. 2018. Effect of heat stress on common bean under natural growing conditions in three locations in different climate zones in the state of So Paulo, Brazil. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 10 (6): 134–145. <https://doi.org/10.5897/jpbcs2018.0726>
- Deva CR, Urban MO, Challinor AJ, Falloon P, Svitáková L. 2020. Enhanced leaf cooling is a pathway to heat tolerance in common bean. *Frontiers in plant science* 11: 19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00019>
- Fogaça AM, Barbosa EAA, Barbosa EAA. 2023. Physiological and morphological responses of two beans common genotype to water stress at different phenological stages. *Bioscience Journal* 39: e39053. <https://doi.org/10.14393/bj-v39n0a2023-59855>
- Flores-Pacheco JA, Sánchez WJL, Sevilla JJM. 2019. Necesidades hídricas del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) INTA rojo en condiciones del trópico húmedo de Nicaragua. *La Calera* 19 (32): 16–23. <https://doi.org/10.5377/calera.v19i32.8436>
- Guerrero-Domínguez L, González-Pérez BL, Jerez-Mompie EI, Morales-Guevara D, Cruz-Suárez AS. 2023. Behavior of Common Bean Plants (*Phaseolus vulgaris* L.) Subjected to Two Irrigation Systems. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 32 (4). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93276285006>
- Hernández DC, Ariza RG, Avilés MAM. 2019. Tolerancia a estrés hídrico en frijol cv. Pinto Saltillo modificado con el gen pirofosfatasa vacuolar-1 de

- Arabidopsis thaliana. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 10 (6): 1231-1245. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.789>
- Hernández-Figueroa KI, Chávez ES, Ojeda-Barrios DL, Chávez-Mendoza C, Muñoz-Márquez E. 2022. Efectividad a la aplicación de bioestimulantes en frijol ejotero bajo estrés hídrico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 28: 149-160. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3270>
- ISTA (International Rules for Seed Testing). (2023). <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html> (Recuperado: diciembre 2023).
- Kimani PN, Kumar SN, Harit R, Kumar Y. 2022. Interactive effect of irrigation and temperature regimes on growth and development of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Agrometeorology 24 (2): 196-199. <https://doi.org/10.54386/jam.v24i2.1637>
- Laoye JA, Ogunsua BO, Kareem SO. 2021. Links between the complexities in atmospheric-soil energy exchange and temperature dynamics in tropical regions. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 219, 105651. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105651>
- Latorre DAG, Leguizamon YR, Ortega ER, Rivera AT. 2023. Estimación del efecto de la sequía sobre la productividad de frijol variedad AGROSAVIA rojo 43 en el Caribe colombiano. Avances En Investigación Agropecuaria 27 (1). <https://doi.org/10.53897/revaia.23.27.03>
- Lépiz-Ildefonso R, Chavarín-Espinoza IE, López-Alcocer JDJ, Rodríguez-Guzmán E. 2018. Acumulación de materia seca durante las etapas de desarrollo de variedades de frijol. Revista fitotecnia mexicana 41 (3): 275-283. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61059021008>
- León-Rojas GI, Rodríguez-Soto C, Padilla-Loredo S. 2020. La conservación in situ del frijol criollo: construyendo soberanía alimentaria en el sureste del Estado de México. Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana (9): 125-141. <https://www.redalyc.org/pdf/6681/668170996011>
- Liu W. 2024. Variation in Water Deficit and Its Association with Climate Indices in Weihe River Basin, China. Atmosphere 15: 339. <https://doi.org/10.3390/atmos15030339>
- Maqueira-López LA, Roján-Herrera O, Solano-Flores J, Milagros-Santana I. 2021. Germinación de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a diferentes temperaturas. Cultivos Tropicales 42 (2): 03. <https://doi.org/10.1234/ct.v42i2.1587>
- Mohammed SB, Ongom PO, Togola A, Boukar O. 2024. Enhancing Cowpea Tolerance to Elevated Temperature: Achievements, Challenges and Future Directions. Agronomy 14: 513. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030513>
- Montero-Tavera V, Gutiérrez-Benicio GM, Mireles-Arriaga AI, Aguirre-Mancilla CL, Acosta-Gallegos JA, Ruiz-Nieto JE. 2019. Efectos fisiológicos del estrés hídrico en variedades de frijol tolerantes a la sequía. Acta Universitaria 29: 1-7. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1816>

- Nemeskéri E, Helyes L. 2019. Physiological Responses of Selected Vegetable Crop Species to Water Stress. *Agronomy* 9: 447. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080447>
- Padilla-Chacón D, Peña-Valdivia CB, García-Esteva A, Cayetano-Marcial MI, Kohashi-Shibata J. 2019. Phenotypic variation and biomass partitioning during post-flowering in two common bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.) under water restriction. *South African Journal of Botany* (121): 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.10.031>
- Papathanasiou F, Ninou E, Mylonas I, Baxevas D, Papadopoulou F, Avdikos I, Sistanis I, Koskosidis A, Vlachostergios DN, Stefanou S, Tigka E, Kargiotidou A. 2022. The Evaluation of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes under Water Stress Based on Physiological and Agronomic Parameters. *Plants* 11: 2432. <https://doi.org/10.3390/plants11182432>
- Pérez-Iriarte C, Sánchez-Delgado M, Razuri-Ramírez L, Enciso-Gutiérrez A. 2021. Dosis de riego y coeficiente del cultivo (Kc) en la producción del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en Lima, Perú. *Revista Ingeniería UC 28* (3): 349-359. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i3.44>
- Pohlmann V, Lago, I, Lopes, SJ, Zanon AJ, Streck NA, Martins JT da S, Caye M, Bittencourt PN, Santana VFK de, Portalanza D. 2022. Water deficit tolerance of bean cultivars. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 57: 02479. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02479>
- Polanía JA, Salazar-Chavarría V, Gonzalez-Lemes I, Acosta-Maspons A, Chater CCC, Covarrubias AA. 2022 Contrasting *Phaseolus* Crop Water Use Patterns and Stomatal Dynamics in Response to Terminal Drought. *Front. Plant Sci* 13: 894657. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.894657>
- Rai A, Sharma V, Heitholt JJ. 2020. Dry Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Growth and Yield Response to Variable Irrigation in the Arid to Semi-Arid Climate. *Sustainability* 12 (9): 3851. <https://doi.org/10.3390/su12093851>
- Ramírez-Jaspeado R, Palacios-Rojas N, Nutti MR., Pérez S. 2020. Estados potenciales en México para la producción y consumo de frijol biofortificado con hierro y zinc. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43 (1): 11. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.11>
- Rodríguez IY, Porch T, Beaver J, Sotomayor JCR. 2021. Evaluación fenotípica de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo condiciones de estrés de sequía y altas temperaturas. *CEIBA (Edición Zamorano Investiga)* 52-64. <https://revistas.zamorano.edu/index.php/CEIBA/article/view/1268/1204>
- Romero-Félix CS, López-Castañeda C, Kohashi-Shibata J, Martínez-Rueda CG, Miranda-Colín S, Aguilar-Rincón VH. 2018. Ambiente y genotipo: Efectos en el rendimiento y sus componentes, y fenología en frijol común. *Acta Universitaria* 28 (6): 20-32. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1760>

- Romero-Félix CS, López-Castañeda C, Kohashi-Shibata J, Miranda-Colín S, Aguilar-Rincon VH, Martínez-Rueda CG. 2019. Cambios en el rendimiento y sus componentes en frijol bajo riego y sequía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 10 (2): 351-364. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1607>
- Romero-Félix CS, López-Castañeda C, Kohashi-Shibata J, Martínez-Rueda CG, Miranda-Colín S, Aguilar-Rincón VH. 2021. Rendimiento y biomasa acumulada en frijol común bajo riego y secano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 12 (8): 1363-1376. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2682>
- Rosales-Serna R, Flores-Gallardo H, López-González JC, Rubiños-Panta JE, Ortiz-Sánchez AI, Flores-Magdaleno H, Santana-Espinoza S, Domínguez-Martínez PA. 2021. Fenología y productividad del agua en variedades mejoradas de frijol pinto cultivadas en Durango, México. *Revista fitotecnia mexicana* 44 (4): 511-519. <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/44-4/3a>
- Rose T, Lowe C, Miret JA, Walpole H, Halsey K, Venter E, Urban MO, Buendia HF, Kurup S, Osullivan DM, *et al.* 2023. High temperature tolerance in a novel, high-quality *Phaseolus vulgaris* breeding line is due to maintenance of pollen viability and successful germination on the stigma. *Plants* 12 (13): 2491. <https://doi.org/10.3390/plants12132491>
- SAS (SAS institute). 2023. https://www.sas.com/es_mx/learn/academic-programs/software.html (Recuperado: noviembre 2023).
- Sofi PA, Rehman K, Gull M, Kumari J, Djanaguiraman M, Prasad PVV. 2021. Integrating root architecture and physiological approaches for improving drought tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Physiol.* 26: 4–22 <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00570-8>
- Soltani A, Weraduwage SM, Sharkey TD, Lowry DB. 2019. Elevated temperatures cause loss of seed set in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) potentially through the disruption of source-sink relationships. *BMC Genomics* 20: 312. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5669-2>
- Soureshjania HK, Nezamia A, Kafia M, Tadayon M. 2019. Responses of two common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 213: 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.038>
- Suárez JC, Polanía JA, Contreras AT, Rodríguez L, Machado L, Ordoñez C, Beebe S, Rao IM. 2020. Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: Genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica* 216 (2): 28. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-2565-4>
- Seleiman MF, Al-Suhaibani N, Ali N, Akmal M, Alotaibi M, Refay Y, Dindaroglu T, Hafiz Haleem Abdul-Wajid HH, Battaglia ML. 2021. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants* 10, 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>

- Tang C, Chen D. 2017. Interaction between soil moisture and air temperature in the Mississippi river basin. *J. Water Resour. EPA Public Access*. 9 (10): 1119–1131. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.910073>
- Tapia G, Méndez J, Inostroza L, Lozano C. 2022. Water Shortage Affects Vegetative and Reproductive Stages of Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) Chilean Landraces, Differentially Impacting Grain Yield Components. *Plants*. 11 (6): 749. <https://doi.org/10.3390/plants11060749>
- Tene TM, Sari H, Canci H, Maaruf A, Eker T, Toke C. 2023. Traits Related to Heat Stress in *Phaseolus* Species. *Agriculture* 13, 953. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050953>
- Vargas Y, Mayor-Duran VM, Buendia HF, Ruiz-Guzman H, Raatz B. 2021. Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *Plos One* 16 (4): e0249859. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249859>

7.2 Capítulo 2

Temperatura del suelo-aire y profundidad de siembra en plántula de frijol

Mónica Beatriz López Hernández¹

Yaritza Yolanda Quintal Vargas¹

Antonio Villalobos González^{2*}

Enrique Arcocha Gómez¹

¹ Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Chiná – Posgrado en Agroecosistemas Sostenibles. Calle 11 s/n entre 22 y 28, Chiná, San Francisco de Campeche, Campeche, México. C.P. 24520. Tel. 981 827 2082 (M14830119@china.tecnm.mx; monica.lh@china.tecnm.mx; enrique.ag@china.tecnm.mx)

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – Campo Experimental Edzná. Campeche, México. Carretera Campeche-Poxyaxum km 15.5, Campeche, México. C.P 24520. Tel.

* **Autor para correspondencia:** villalobos.antonio@inifap.gob.mx

Resumen

La temperatura del aire y suelo, la profundidad de siembra en etapa temprana de frijol desempeña un papel importante en la emergencia de plántulas. Por lo que, en el ciclo de V-O 2023 en el Instituto Tecnológico de Chiná, se estudió la respuesta de la temperatura del aire-suelo y la profundidad de siembra en plántulas de frijol con base a riego y estrés hídrico en condiciones de cielo abierto en camas de suelo Luvisoles férricos, analizando la elongación del epicotilo e hipocótilo y otros caracteres de plántulas provenientes de tres tamaños de semilla (chica, mediana y grande). Las altas temperaturas del aire y del suelo, más su combinación con el contenido de humedad del suelo y la profundidad de siembra, redujo el porcentaje de emergencia y las estructuras de la plántula de todos los genotipos y tamaños de semilla de frijol. A mayor profundidad de siembra, la temperatura del suelo es menor con respecto a la de menor profundidad. Con semilla grande se obtuvo mayor capacidad de emergencia, elongación de epicotipo e hipocótilo y materia seca de la mayoría de las estructuras de la plántula para ambas condiciones de humedad. Con semilla grande y riego, sobresalió el genotipo Sangre Maya, seguido del genotipo Michigan con el tamaño de semilla chica al presentar una mayor adaptabilidad en condiciones de déficit hídrico. Se obtuvo una fuerte correlación entre el hipocotilo-raíz-biomasa total.

Palabras clave: estrés hídrico, plántula, genotipo.

Introducción

En México el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa de grano importante especialmente entre la población de las regiones menos desarrolladas, cultivándose principalmente en ambientes tropicales y planicies semiáridas (Flores *et al.*, 2017). En el estado de Campeche, el frijol negro se siembra principalmente en condiciones de temporal y humedad residual en condiciones climáticas con temperaturas máximas en promedio que oscilan en 34.2 °C y precipitaciones máximas de 122.6 mm (CONAGUA). Sin embargo, la producción en estas áreas agrícolas se ve amenazada por las altas temperaturas y la distribución de las precipitaciones, haciéndolas altamente vulnerables a causa de la variabilidad del clima y al cambio climático; limitando el porcentaje de germinación de la semilla y emergencia de las plántulas lo que trae como consecuencia un menor establecimiento en campo (Medina-García *et al.*, 2016; Dubal *et al.*, 2016).

El proceso de germinación de la semilla de frijol depende de los factores abióticos, como la temperatura, el agua, el oxígeno y la luz, comenzando con diferentes actividades anabólicas y catabólicas, como la respiración, la síntesis de proteínas y el flujo de las reservas, posterior a la absorción de agua (Suarez y Melgarejo, 2010; Caroca *et al.*, 2016). Mientras que la emergencia depende de las características fisiológicas y bioquímicas de las semillas, de su comportamiento a las condiciones externas y de la eficiencia al implementar sus reservas durante la etapa de germinación (Morales-Santos *et al.*, 2017).

Así mismo, otro factor importante a considerar es la profundidad de la siembra, ya que una siembra muy superficial resultaría con una humedad inadecuada en la capa superior del suelo para la germinación (Peña-Valdivia *et al.*, 2013); por otro lado, una siembra demasiado profunda ocasionaría que la semilla no pueda levantar su cotiledón por encima del suelo (Baye *et al.*, 2020). Rosabal *et al.* (2014) afirma que el crecimiento del hipocótilo y el epicótilo tiene un papel importante en la emergencia de la planta, lo cual está influenciado por las condiciones ambientales. Sin embargo, los órganos subterráneos (raíz o radícula) de la planta se desarrollan más rápido que los órganos aéreos (tallo o hipocótilos), esto con el fin de lograr su climatización (Barrios-Gómez *et al.*, 2012).

Una estrategia para mejorar la emergencia de plántulas es la uniformidad del tamaño de la semilla dado que las semillas con mayores densidades pueden poseer un embrión bien formado y mayor cantidad de reserva, lo que hace que sean más vigorosas especialmente en condiciones estresantes (Rodríguez *et al.*, 2021). No obstante, hay evidencia de que puede ocurrir lo opuesto, es decir, que el tamaño de la semilla no afecte el vigor y germinación del frijol común (Steiner *et al.*, 2019).

Aún hay mucho interés por esclarecer ese cuestionamiento y por obtener conocimiento sobre si existe una relación entre el tamaño de semilla y el genotipo, y si esa relación permanece cuando la siembra ocurre en diferentes profundidades bajo condiciones de estrés abiótico (Finch-Savage y Bassel, 2016).

Por esto, los resultados pretenden contribuir a nuevas estrategias que se puedan sugerir, especialmente a los pequeños productores. Debido a lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar el efecto del déficit hídrico, alta temperatura y profundidad de siembra

en etapa temprana de cuatro variedades de *Phaseolus vulgaris* L. (Peruano, Michigan, Sangre Maya y Bayo) en condiciones de campo.

Materiales y Métodos

Descripción del sitio

El experimento se realizó a un costado del área de invernaderos del Tecnológico Nacional de México campus Chiná, localizado en Calle 11 S/N entre 22 Y 28, Chiná, Campeche, México (19° 46' 15" N, 91° 29' 41" W y 20 msnm) en el ciclo verano-otoño 2023. La localidad de Chiná tiene un clima del tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una precipitación media de 1600 mm y una temperatura media anual de 27 °C con temperaturas máximas mayor a 30 °C y la mínima de 18 °C (CONAGUA, 2023).

Material genético

El experimento consistió de cuatro genotipos de frijol, que agrupo a tres variedades comerciales: frijol Peruano, Michigan y Bayo y una nativa denominada en la región como Sangre Maya, proveniente del Laboratorio de Agricultura Agroecológica Orgánica Sustentable (LAAOS) del TECNM Campus Chiná.

Para determinar el porcentaje de germinación (PG) de las semillas se realizó la prueba estándar de germinación descrita por la Asociación Internacional de Ensayo de Semillas (ISTA, 2023). Se realizó un ajuste de 25 semillas en lugar de 100 semillas por genotipo, con cuatro repeticiones. Se acomodaron en toallas “sanitas”, a temperatura ambiente, controlando la humedad. Las evaluaciones se realizaron a las 24, 48 y 72 horas.

Establecimiento de los tratamientos

Antes del establecimiento del experimento, se seleccionaron y se clasificaron 250 semillas de cada genotipo en tres tipos de tamaño de semilla. En este sentido, el tamaño de semilla pequeña tuvo una dimensión de 167-277 mg, la mediana 287-337 mg y la grande fue de 347-487 mg. El experimento se realizó a cielo abierto y se emplearon dos camas de cultivos con una medida de 1.05 m de largo x 0.70 m de ancho con dos factores hídricos (riego y sequía). Para ello, se utilizó suelos Luvisoles férricos y conocido localmente como K'an Kab lu'um. Se aplicó un diseño experimental de bloques al azar con dos repeticiones. Cada unidad experimental consistió de 10 plántulas para cada tamaño de semilla y genotipo. Donde las plántulas tuvieron un arreglo entre hileras y semilla de 5 cm. Todas las semillas se sembraron a una profundidad de 15 cm.

Para establecer los factores de humedad, se aplicó un riego inicial de saturación en las dos camas de cultivo para mantenerlas a capacidad de campo (CC). Posteriormente la cama de cultivo con el factor de sequía se mantuvo sin riego durante todo el experimento (nueve días). Asimismo, este se cubrió con plástico transparente todas las noches para evitar las precipitaciones de la lluvia. Mientras que el factor riego se mantuvo con humedad constante.

VARIABLES ESTUDIADAS

Para la obtención de los datos de temperatura del suelo (TS, °C) a cuatro profundidades: 5, 10, 15 y 20 cm se empleó un termómetro de suelo KC-300B (Green Tech Instruments,

Veracruz, México). La temperatura máxima y mínima del aire (TA, °C) se determinó con un termómetro digital marca TER-150 (Electrónica Steren, S.A. de C.V., Ciudad de México, México), durante un lapso de nueve días a las 7:00, 13:00 y 19:00 horas, para ambos factores. A los nueve días después de la siembra (dds) se registró la altura de la planta (ALP, cm) y se contabilizó el total de plántulas emergidas calculándose el porcentaje de emergencia (PE) (Campo-Arana y Burgos-Ayala, 2023) y la velocidad de emergencia (VE). Las unidades de medición fueron de plántulas/día (pd^{-1}) (Maguire, 1962).

(1)

$$PE = \frac{\text{Número de semillas germinadas}}{\text{Número de semillas sembradas}} \times 100$$

(2)

$$VE = \sum_i + \frac{np_i}{ND_i} \times 100$$

donde, np_i y ND_i son el número de plántulas y el número de días al conteo i -ésimo, respectivamente.

Posterior a la colecta de las plántulas emergidas, en el laboratorio de Ecofisiología se determinó con una regla milimétrica y un vernier la longitud y diámetro del hipocótilo (LHP, cm y DHP, mm) longitud y diámetro del epicotilo (LEP, cm y DEP, mm), y longitud de raíz (LOR, cm). Para determinar la materia seca (MS, mg) de cada estructura de las plántulas (hipocótilo, epicotilo, hojas y raíz) y materia seca total (MST, mg) se metieron a una estufa de convección natural marca MEMMERT® modelo UNP 400, a 70 °C por 72 horas y posterior se pesaron en una balanza marca METTLER® modelo AE 200.

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos de cada unidad experimental se realizaron análisis de varianza para cada uno de los tratamientos (riego y sequía), se hizo un análisis de correlación múltiple para determinar las relaciones entre las variables por el procedimiento GLM del programa SAS® versión 9.1 para Windows (SAS, 2009). La comparación de medias se realizó mediante la prueba de la diferencia mínima significativa (Tukey) a un nivel de probabilidad de error de $P \leq 0.05$.

Resultados y discusión

El estrés hídrico y el tamaño de semilla afectó significativamente la expresión los caracteres medidos de la semilla de frijol (Cuadro 1). Asimismo, se observó alta interacción por tamaño de semilla, humedad y genotipo para todas las características cuantificadas. Es decir, existe una alta variabilidad entre los genotipos por tamaño de semilla cuando se someten a un estrés hídrico y a una profundidad de siembra de 15 cm. Estas diferencias fueron más notorias para los caracteres de materia seca. Donde la materia seca de raíz y materia seca total presentaron los valores más altos con base a la interacción triple, respectivamente (Cuadro 1). Estudios posteriores en frijol indican que algunos genotipos presentan menor tolerancia a las altas temperaturas (28 °C) (Kasi *et al.*, 2019) y que indirectamente repercuten al desarrollo y crecimiento del frijol (Vargas *et al.*, 2021) en sus distintas etapas.

Cuadro 1. Resultados del ANOVA de cuadrados medios de la longitud de epicótilo y otras variables de frijol con base al tamaño de semilla en condición de riego y sequía durante el ciclo V-O 2023. Campeche, Campeche, México.

FV	GL	PE	VE	LONE	LONH	ANE	ANH	ALP
REP	3	1.04 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.38*	2.11**	0.19 ^{ns}	0.32*	0.80*
TAM	2	291.1**	0.18*	4.87**	54.45**	1.17**	2.04**	64.91**
HUM	1	42.1**	0.09*	0.20 ^{ns}	2.17 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.11 ^{ns}	23.49**
GEN	3	994.9**	0.32**	3.35**	106.86**	1.38**	2.32**	95.92**
TAM*HUM	2	117.1**	0.01 ^{ns}	1.31**	49.41**	0.70**	0.28*	29.77**
TAM*GEN	6	164.7**	0.05*	1.02**	20.63**	0.30**	0.39**	11.32**
HUM*GEN	3	124.1**	0.04 ^{ns}	2.24**	27.13**	0.68**	0.82**	36.83**
TAM*HUM*GEN	6	157.4**	0.10*	0.66*	16.34**	0.17 ^{ns}	0.15*	15.71**
Error	69	0.19	0.02	0.08	1.02	0.03	0.05	0.21
Total	95							
C.V. %		2.44	37.08	30.12	21.10	29.70	32.53	12.21

FV	GL	LONR	MSE	MSH	MSHO	MSR	MST
REP	3	0.31 ^{ns}	1.00 ^{ns}	19.21 ^{ns}	4.81 ^{ns}	5.79 ^{ns}	56.15 ^{ns}
TAM	2	8.33**	831.81**	2840.09**	652.30**	3396.04**	22894.36**
HUM	1	8.22**	1134.58**	1998.66**	72.05**	6780.12**	23177.97**
GEN	3	16.92**	679.59**	4756.14**	1359.84**	9660.25**	40000.64**
TAM*HUM	2	7.60**	912.14**	3147.38**	309.06**	2105.59**	19594.41**
TAM*GEN	6	5.77**	386.27**	461.22**	181.83**	1489.20**	4470.02**
HUM*GEN	3	7.97**	747.22**	1805.70**	49.31**	2273.27**	6417.98**
TAM*HUM*GEN	6	2.86**	338.99**	790.24**	245.97**	1059.93**	3956.68**
Error	69	0.29	1.14	15.46	3.04	9.09	36.80
Total	95						
C.V. %		26.35	17.79	14.86	16.55	13.80	9.99

FV=factor de variación; REP=repetición; HUM=humedad; TAM=tamaño de semilla; GEN=genotipo; PE=porcentaje de emergencia (%); VE= velocidad de emergencia (pd^{-1}); ALP=altura de plántula (cm); ANE=ancho epicótilo (mm); LONE=longitud epicótilo (cm); ANH= ancho hipocótilo (mm); LONH=longitud hipocótilo (cm); LONR=longitud raíz (cm); MSE=materia seca epicótilo (mg); MSH=materia seca hipocótilo (mg); MSHO=materia seca hojas (mg); MSR=materia seca raíz (mg); MST=materia seca total (mg).

Temperatura del aire

Durante el desarrollo del experimento se presentó una variación de la temperatura del aire (Figura 1). Asimismo, estas fueron más elevadas durante el medio día (13:00 horas), desde 32 a 38 °C con respecto a las temperaturas al amanecer (7:00 am) y tarde (7:00 pm). Donde al amanecer se presentaron temperaturas de entre 29 a 32 °C. Mientras que, durante la tarde, se obtuvo una variación de 26 a 30 °C. Estos estudios se asemejan a los obtenidos por Rosas et al. (2023), al observar temperaturas diurnas de entre 24 a 39 °C durante el ciclo del cultivo de frijol. Asimismo, estos superan a las temperaturas óptimas (25 °C) para el desarrollo y crecimiento del frijol (Balkaya, 2004; Barrios-Gómez et al., 2011). Sin embargo, se ha observado que algunas variedades de frijol pueden ser viables en temperaturas máximas de 30 °C (Maqueira-López et al., 2021).

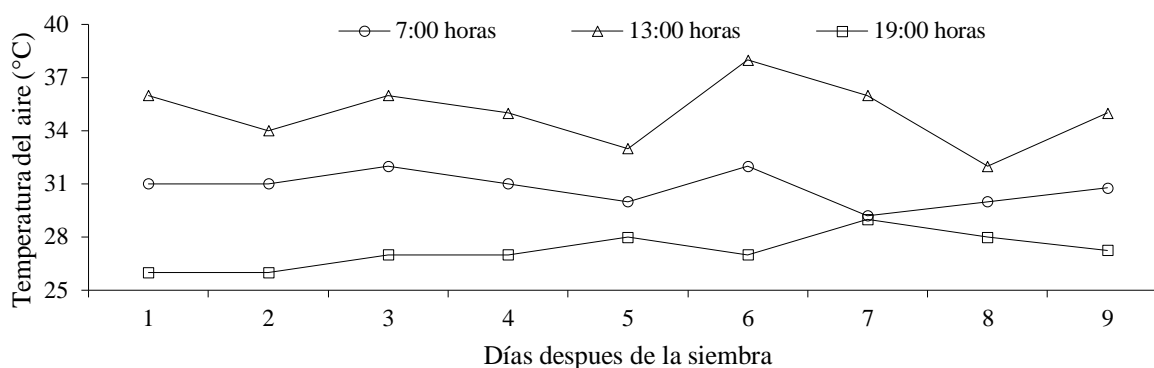


Figura 1. Temperaturas máximas del aire en tres horas del día (7:00, 13:00 y 19:00 horas) después de la siembra, hasta la emergencia de las plántulas de frijol, durante el ciclo V-O 2023. Campeche, Campeche, México.

Temperatura del suelo

La temperatura del suelo fue variada con base a la profundidad del suelo, la condición de humedad y la hora del día (Figura 2). Es decir, las temperaturas fueron más altas durante el medio día en ambas condiciones de humedad; sin embargo, tanto en riego y sequía estas fueron más bajas a una mayor profundidad (20 cm) con respecto a las de menor profundidad (5 cm). En este sentido, en condiciones de riego durante el día: a las 7:00, 13:00 y 19:00 horas, y a una profundidad de 5 cm se presentó en promedio una temperatura de 29, 39 y 31 °C respectivamente. Mientras que en condiciones de estrés (sequía) se obtuvo una temperatura promedio de 29, 38 y 31 °C (Figura 2A).

Con respecto a una profundidad de 10 cm del suelo con base a riego, los promedios de temperatura oscilaron entre 29 °C (7:00 am), 37 °C (13:00 horas) y 32 °C (19:00 horas). Mientras que, en sequía, la temperatura fue de 29, 38 y 33 °C (Figura 2B). Cuando la profundidad se encuentra a 15 cm la temperatura del suelo en promedio registrada en condición de riego fue de 29, 35 y 33 °C y en sequía de 29, 35 y 34 °C (Figura 2C). En relación a la profundidad de 20 cm, la temperatura promedio obtenida en riego fue de 29, 33 y 33 °C y en sequía de 30, 33 y 33 °C (Figura 2D).

La temperatura promedio registrada para ambas condiciones de humedad y a una profundidad de 5 y 10 cm, fueron superiores a las temperaturas reportadas por Blanco y Montes, (1993) para la germinación de semillas de frijol común (29-34 °C); por el contrario, cuando la profundidad del suelo es de 15 y 20 cm, la temperatura se mantiene cerca del máximo en ambas condiciones de humedad. En trabajos recientes, se ha observado que un rango de temperatura entre 30-35 °C favorece la germinación y emergencia de las semillas de frijol caupi en condiciones de humedad (Barros *et al.*, 2020). Así mismo, Neto *et al.* (2006) explica que los rangos óptimos de temperaturas para la germinación y emergencia del frijol depende del genotipo, ya que para las razas evaluadas encontró rangos de 27 y 35°C y 22 a 35°C para los cultivares 'IAC Carioca-Akytã' y 'Rudá' respectivamente. Por otro lado, Amin *et al.* (2023)

observo que la temperatura está relacionada con el potencial hídrico en la germinación del frijol, ya que cuando la temperatura oscilaba en 30 °C con un óptimo potencial hídrico, las semillas germinaban en su mayoría, lo contrario cuando la temperatura del suelo aumentaba (45 °C) y el potencial hídrico disminuía.

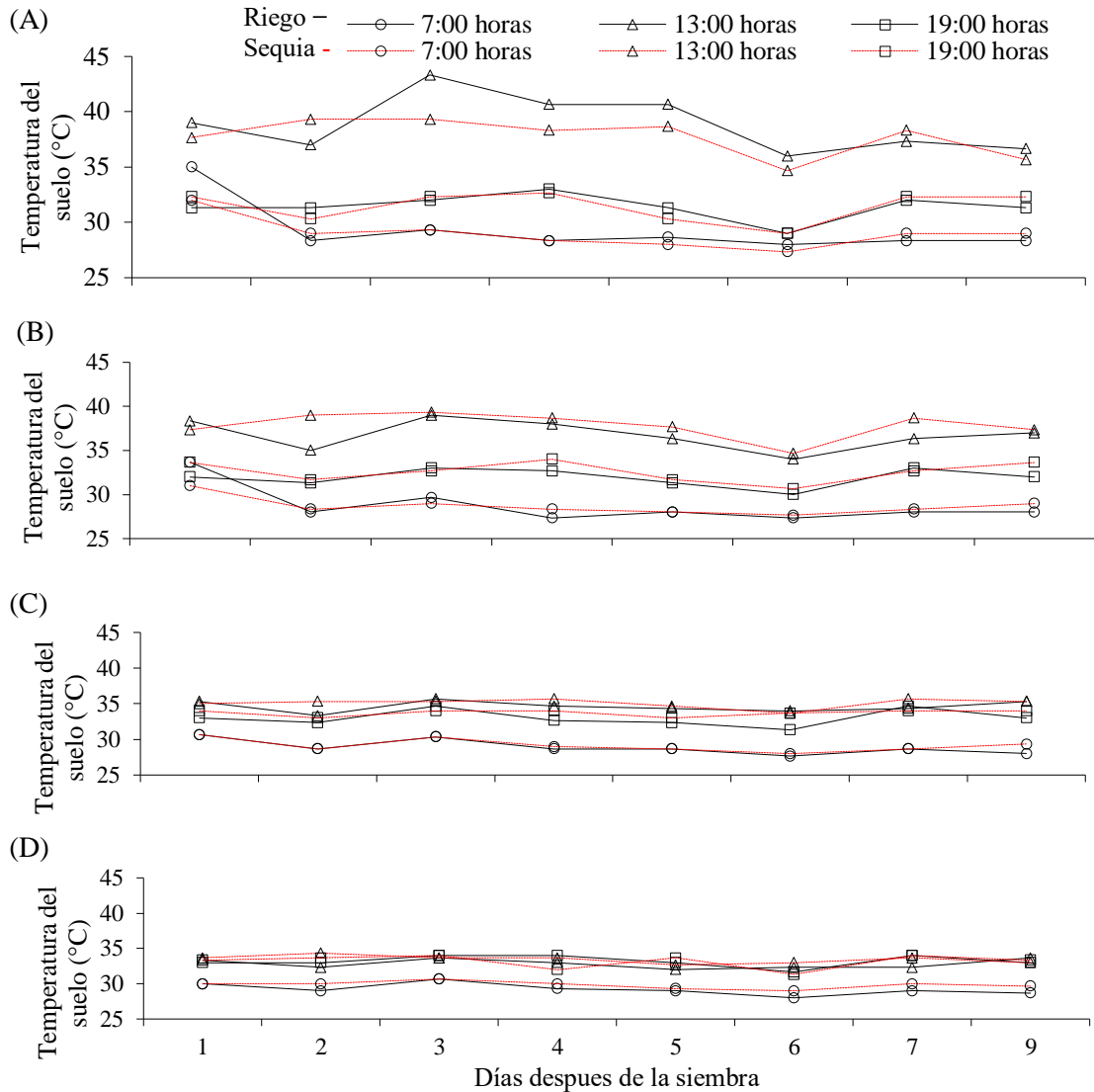


Figura 2. Temperatura del suelo con base a diferentes profundidades del suelo durante tres horas del día (7, 13 y 19 horas) en condiciones de riego y sequía. Temperatura del suelo a una profundidad de 5 cm (A), 10 cm (B), 15 cm (C) y 20 cm (D). Ciclo V-O 2023. Campeche, Campeche, México.

Humedad del suelo

Al evaluar el factor humedad del suelo (riego y sequía) con respecto a la temperatura, se encontraron diferencias ($p \leq 0.05$) para todas las variables estudiadas (Figura 3). Esto fue más evidente en la condición de riego. Es decir, que una humedad deficiente en el suelo afecta el crecimiento del frijol independientemente de la variedad (Pedroza-Sandoval *et al.*, 2016). Se ha observado que, cuando existe condiciones hídricas ineficientes en ambientes con estrés térmico, el PE (Figura 3A) y la VE (Figura 3B) pueden verse afectados parcialmente o en su totalidad (Ojeda-Silvera *et al.*, 2015), al igual que la elongación de la raíz (Figura 3H). Reyes-Matamoros *et al.* (2014) observaron que la emergencia de *Phaseolus vulgaris* L. y *Phaseolus coccineus* L. en condiciones de riego y temperaturas que oscilaron arriba de 35 °C, reportaron un porcentaje del 95 % presentado buena viabilidad.

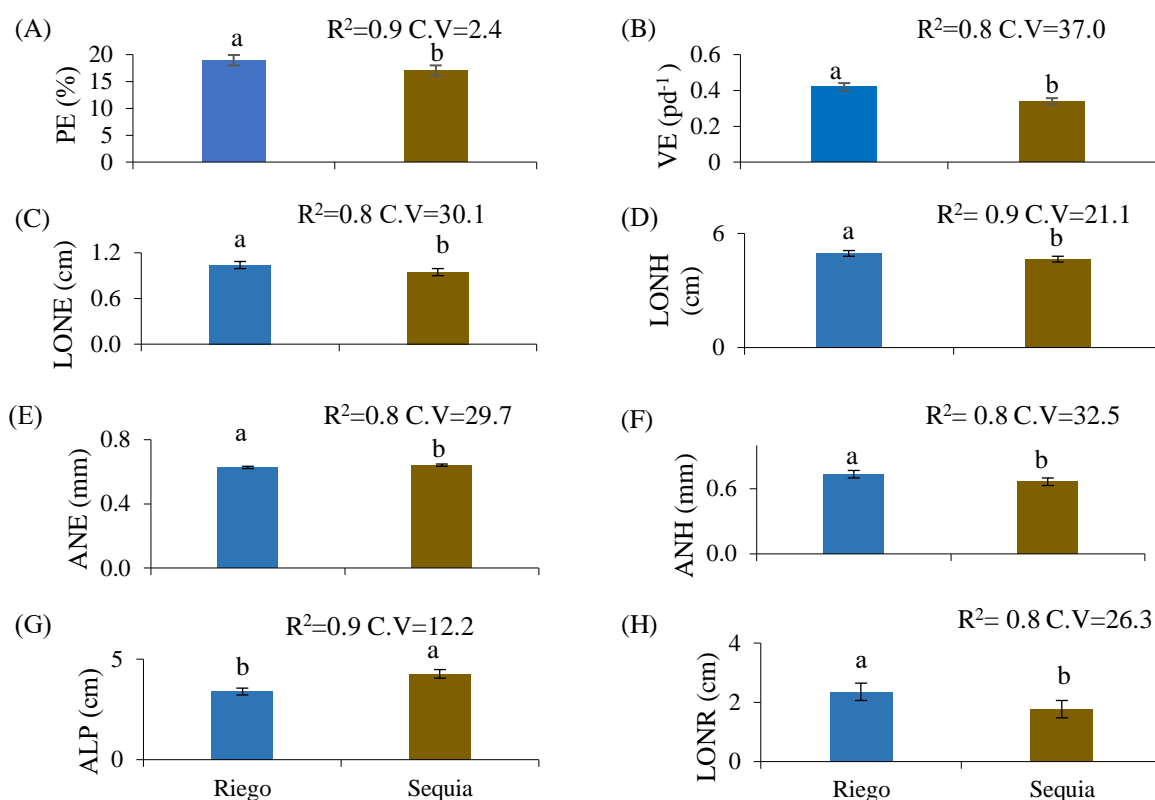


Figura 3. Comparación de medias para frijol con base a riego y sequía. PE=porcentaje de emergencia (%); VE=velocidad de emergencia (pd⁻¹); ALP=altura de plántula (cm); ANE=ancho epicotilo (mm); LONE=longitud epicotilo (cm); ANH= ancho hipocotilo (mm); LONH=longitud hipocotilo (cm); LONR=longitud raíz (cm), durante el ciclo V-O 2023. Campeche, Campeche, México.

Otros estudios indican que los órganos subterráneos (raíz o radícula) de la planta se desarrollan más rápido que los órganos aéreos (tallo o hipocótilos), esto con el fin de lograr su aclimatización (Barrios-Gómez *et al.*, 2012). Se conoce que el crecimiento del hipocótilo y el epicótilo tiene un papel importante en la emergencia de la planta, lo cual está influenciado por las condiciones ambientales (Rosabal *et al.*, 2014). Mendoza *et al.* (2020) en variedades de frijol cubano bajo estrés hídrico presento efectos negativos afectando la germinación de las semillas, significando una disminución del porcentaje de germinación, el escaso desarrollo de raíces laterales y reducción de la longitud de la raíz principal, del hipocótilo y el epicótilo respectivamente, perjudicando la aparición de las hojas verdaderas. De igual forma, Domínguez *et al.* (2014) observaron un 60 % de inhibición en la germinación de variedades de *Phaseolus vulgaris* y la incidencia negativa del epicótilo y en consecuencia la parte aérea en etapas tempranas de frijol. Así mismo, la variable raíz se vio afectado, reduciendo su alargamiento, esto para evitar la deshidratación del tejido, lo cual se debe en parte a la arquitectura de la raíz (Ruscitti *et al.*, 2007). Resultados similares encontrados en nuestros datos.

El factor hídrico (sequia) afecto de forma significativa la producción de materia seca de la parte aérea (hojas simples) y la materia seca de la raíz (Figura 4). Esto pudo ocurrir a la afectación que provoca el estrés hídrico en la división y elongación celular (Cruz-Suarez *et al.*, 2022). De acuerdo, con los resultados los mayores valores presentados en condición de déficit hídrico fue la variable materia seca en hojas. La acumulación de la materia seca en las plantas está relacionada con el grado de humedad del suelo debido al desencadenamiento de procesos adaptativos que traen una disminución marcada (Ojeda-Silvera *et al.*, 2015).

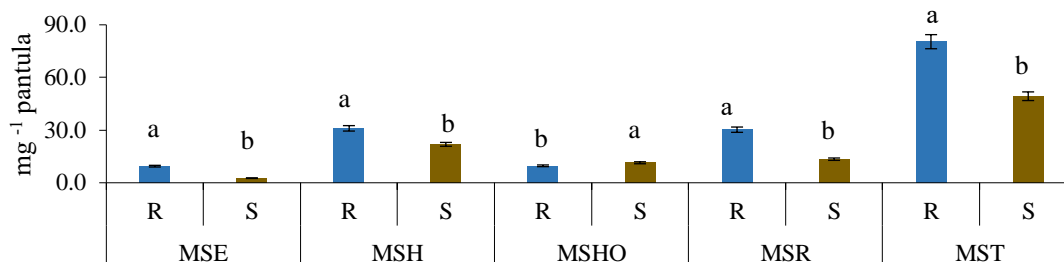


Figura 4. Comparación de medias para frijol con base a riego (R) y sequía (S). MSE=materia seca epicótilo (mg); MSH=materia seca hipocótilo (mg); MSHO=materia seca hojas (mg); MSR=materia seca raíz (mg); MST=materia seca total (mg).

Tamaño de semilla

El resultado obtenido con respecto al tamaño de semilla en las dos condiciones de humedad (riego y sequia) y altas temperaturas, muestran que hubo diferencia significativa en la emergencia y las estructuras de las plántulas de frijol (Figura 5). Se ha identificado, que el tamaño de semilla es un factor que influye en la germinación y emergencia del frijol común, siendo importante para el establecimiento temprano en diferentes condiciones ambientales

(Pinedo-Taco *et al.*, 2022), ya que representa una transición rápida a la fase de crecimiento en el ciclo de vida de una planta (Vidak *et al.*, 2022).

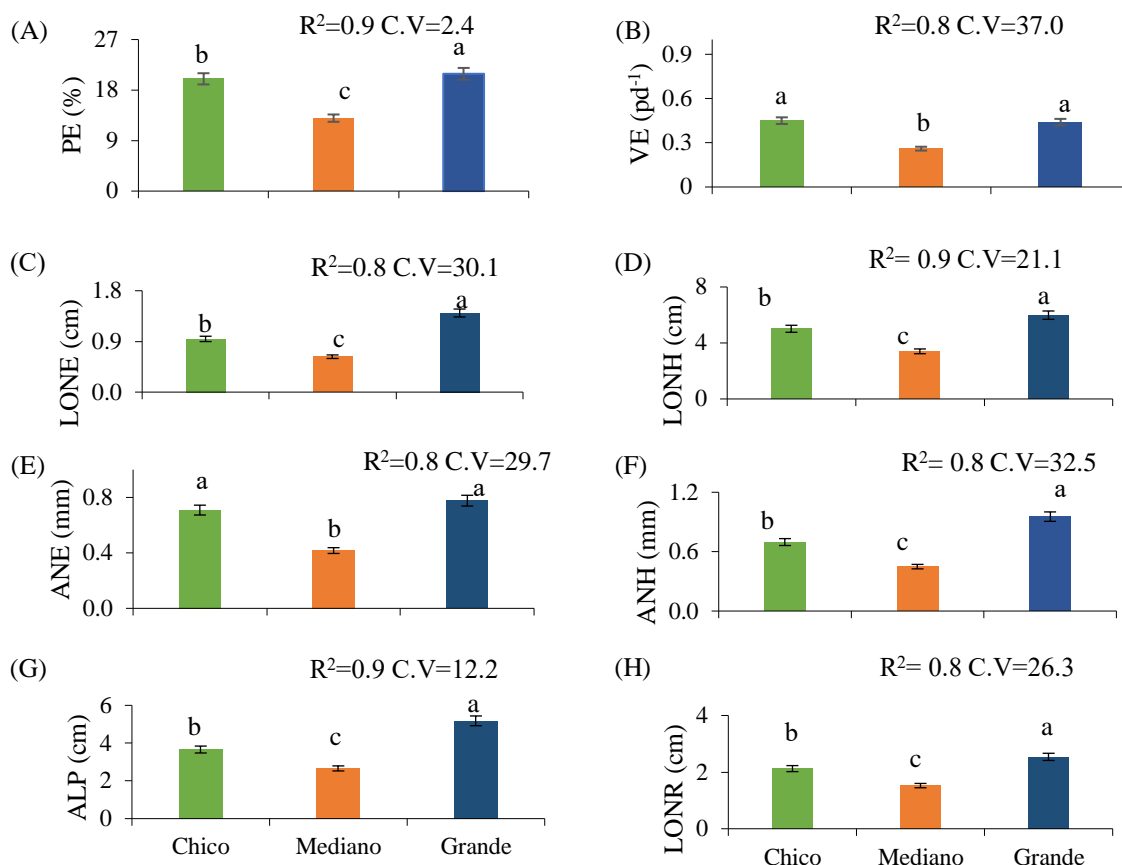


Figura 5. Comparación de medias con base a variables medidas en frijol por tamaño de semilla. PE= porcentaje de emergencia (A); VE= velocidad de emergencia (B); LONE=longitud epicotilo (cm) (C); LONH=longitud hipocotilo (cm) (D); ANE=ancho epicotilo (mm) (E); ANH= ancho hipocotilo (mm) (F); ALP=altura de plántula (cm) (G); LONR=longitud raíz (cm) (H).

El presente estudio muestra que independientemente del genotipo del frijol las semillas grandes tienen un porcentaje de emergencia más alto, con base a la profundidad de siembra (15 cm). Referente a la velocidad de emergencia no se encontró diferencias en semillas chicas y grandes, es decir el tiempo de emergencia fue el mismo en semillas chicas y grandes, sin embargo, en el porcentaje de emergencia (PE), a través de tamaño grande de semilla se obtuvo mayor PE (Figura 5A, 5B). Algunos estudios indican que las semillas grandes necesitan más tiempo para absorber el agua requerido para germinar, en comparación con las semillas pequeñas (Souza y Fagundes, 2014). Mientras que Steiner et al. (2019) sugiere que las semillas grandes tienen una mejor calidad fisiológica y son más vigorosas en condición de humedad, sin embargo, las semillas pequeñas son más eficientes en déficit hídrico. En

cuanto al desarrollo del hipocotilo no se encontró diferencia entre el tamaño de semilla chica y semilla grande (Figura 5E) y la raíz fue más eficiente en tamaño de semilla grande. Este hecho lo explica Pereira et al. (2013) en donde puede existir dos hechos; siendo que las plántulas de las semillas pequeñas tienen un mejor desarrollo del hipocotilo o que las plántulas provenientes de semillas grandes tienen una raíz con mayor longitud.

En acumulación de materia seca las plántulas provenientes semillas de tamaño chico mostraron los valores más altos en hipocotilo y epicotilo, por el contrario, las hojas se reflejaron en semillas grandes (Figura 6). En la radícula no se encontró diferencias para tamaño de semilla chica como en tamaño de semilla grande, siendo así, para materia seca total el tamaño de semilla grande quien demostró un mayor valor. Este hecho ya se había observado por Padilha et al. (2020) que explican que las semillas grandes tienen mayor disponibilidad de reservas nutricionales y cuanto mayor sea esta, mayor será el desarrollo de la plántula, dando como resultado una mayor materia seca.

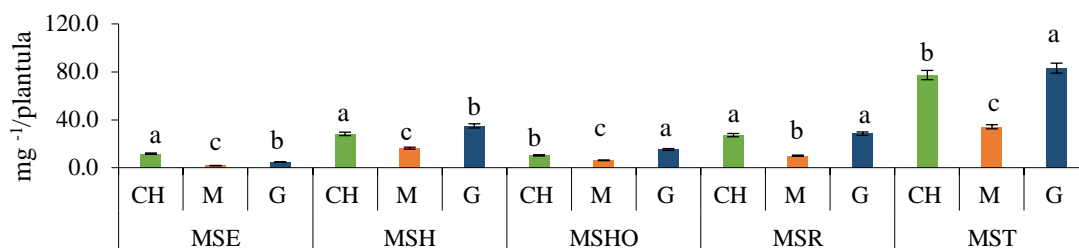


Figura 6. Comparación de medias de las variables de frijol por tamaño de semilla MSE=materia seca epicotilo (mg); MSH=materia seca hipocotilo (mg); MSHO=materia seca hojas (mg); MSR=materia seca raíz (mg); MST=materia seca total (mg).

Genotipo

La tolerancia de un genotipo al déficit hídrico durante la fase de germinación, es una medida de su capacidad para soportar la disminución en el potencial hídrico del medio circundante, que provoca una menor disponibilidad de agua para la imbibición de la semilla (Maldonado *et al.*, 2022). Al observar el factor genotipo del frijol en dos condiciones de humedad (riego y sequía) y altas temperaturas, algunos genotipos fueron más afectados que otros (Figura 7). El genotipo Sangre maya tuvo los valores más altos en la emergencia (%), sin embargo, en cuanto a velocidad de emergencia el genotipo Michigan demostró ser mejor. A pesar de esto, quiere decir que el genotipo Michigan aunque fue más rápido en emergencia, no supero en número de plántulas establecidas en comparación del genotipo Sangre Maya (Figura 7A, 7B).

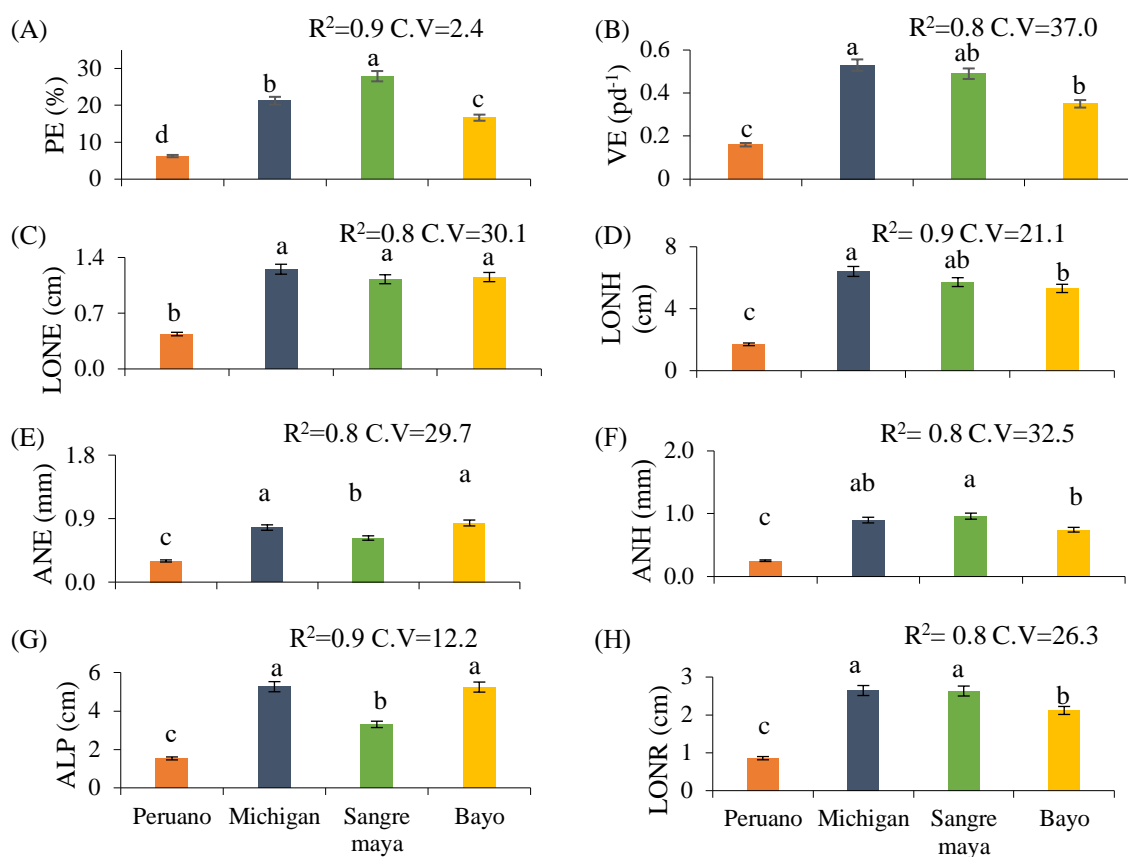


Figura 7. Comparación de medias con base a variables medidas en los genotipos de frijol. PE= porcentaje de emergencia (A); VE= velocidad de emergencia (B); LONE=longitud epicotilo (cm) (C); LONH=longitud hipocotilo (cm) (D); ANE=ancho epicotilo (mm) (E); ANH= ancho hipocotilo (mm) (F); ALP=altura de plántula (cm) (G); LONR=longitud raíz (cm) (H).

Algunos trabajos han demostrado que el genotipo influye bajo ciertas condiciones ambientales estresantes, tales como la temperatura y la humedad (Ligarreto *et al.*, 2015; Tosquy *et al.*, 2017). Estos resultados son similares con los de Domínguez *et al.*, (2014) al evaluar ocho variedades de frijol cubano, al ser los genotipos Cuba Cueto 25-9 negro y la Alubia blanca, los que presentaron mayores porcentajes de inhibición en la germinación bajo estrés hídrico. Sin embargo, difieren con los de Lima *et al.* (2018) al no encontrar diferencias sobre la germinación y emergencia en dos cultivares brasileños (IPR Uirapuru e IPR Campos Gerais) bajo estrés hídrico y temperatura. Al analizar los resultados, de la variable epicotilo en la mayoría de los genotipos no se encontró diferencias significativas (Figura 7C, 7E) por el contrario, los genotipos Michigan y Sangre Maya tuvieron los valores más altos en las variables de longitud de hipocotilo y ancho de hipocotilo respectivamente (Figura 7D, 7F). Se observó, que en la altura de plántula no se encontró diferencias para los genotipos Michigan y Bayo, de esta misma manera para los genotipos Michigan y Sangre Maya en la

variable longitud de raíz. Referente a materia seca de las estructuras y materia seca total, el genotipo Michigan presento diferencia para la mayoría de las estructuras presentado los valores más altos, sin embargo, para materia seca del epicotilo el genotipo Sangre maya presento mejor respuesta (Figura 8). Los diferentes genotipos de frijol respondieron de forma diferente ante el estrés, ya que cada uno tiene sus propios mecanismos que le confieren adaptabilidad a las condiciones de déficit hídrico y las altas temperaturas (Hucl, 1993).

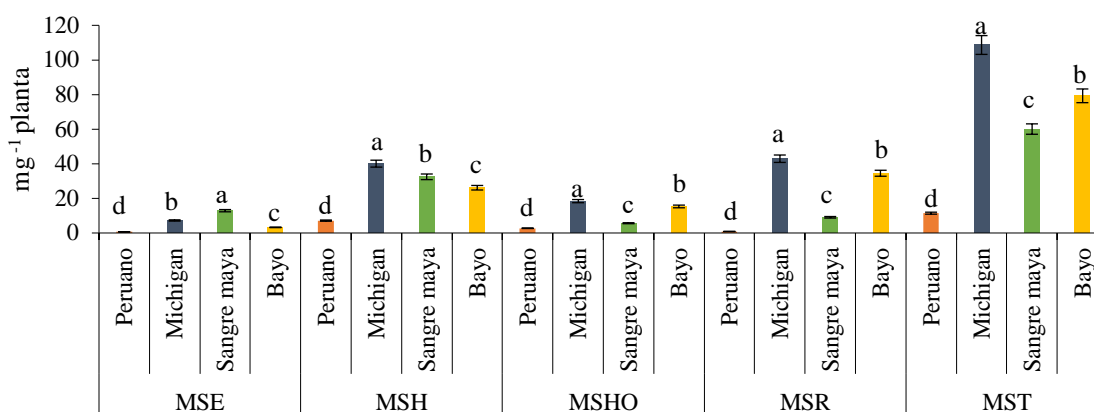


Figura 8. Comparación de medias con base a variables de frijol. MSE=materia seca epicotilo (mg); MSH=materia seca hipocotilo (mg); MSHO=materia seca hojas (mg); MSR=materia seca raíz (mg); MST=materia seca total (mg).

Factor humedad, tamaño de semilla, genotipo

El factor de humedad afectó de manera significativa la emergencia y las estructuras de las plántulas del frijol, esto según el tamaño de semilla utilizada y los diferentes genotipos empleados (Figura 9). Se puede observar que los genotipos con tamaño de semilla grande en condiciones de riego tuvieron la respuesta esperada, al presentar el genotipo Sangre Maya los valores más altos (50 %), en contraste cuando existe el déficit hídrico las semillas grandes fueron ineficientes, sin embargo, las semillas chicas obtuvieron valores medios en los genotipos Bayo (30 %) seguido de Sangre Maya (28 %) (Figura 9A). La velocidad de emergencia reflejo menores diferencias entre los factores estudiados, ya que los resultados muestran que en condición de riego el genotipo Michigan con tamaño de semilla chica obtuvo los valores más altos seguido de Michigan y Sangre Maya con tamaño de semilla grande para ambos. Esto puede deberse a que las semillas grandes necesitan más tiempo para absorber el agua requerido para germinar, en comparación con las semillas pequeñas (Souza y Fagundes, 2014). No obstante, al analizar los resultados de los genotipos Sangre Maya y Bayo con tamaño de semilla chica, no se encontró diferencia cuando se encontraban en ambas condiciones de humedad. Esto quiere decir que cuando existe un déficit hídrico las semillas más grandes sufren un severo deterioro, sin embargo, las semillas pequeñas son más eficientes en déficit hídrico (Steiner *et al.*, 2019) (Figura 9B).

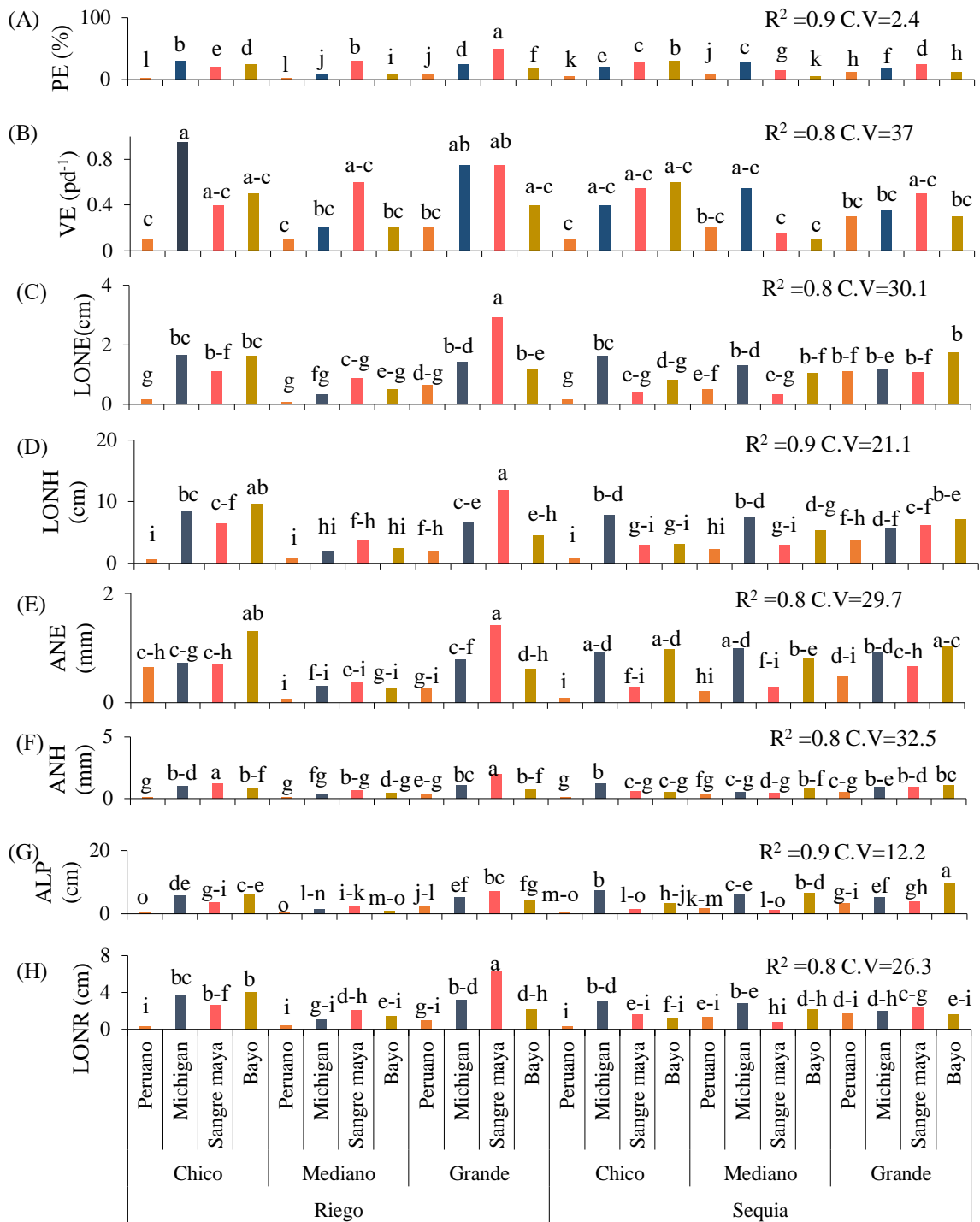


Figura 9. Comparación de medias con base a variables de frijol. ALP=altura de plántula (cm); ANE=ancho epicotilo (mm); LONE=longitud epicotilo (cm); ANH=ancho hipocotilo (mm); LONH=longitud hipocotilo (cm); LONR=longitud raíz (cm).

El genotipo Sangre Maya con tamaño de semilla grande en condiciones óptimas de humedad, demostró diferencia al obtener altos valores en longitud del epicotilo, seguido de genotipo Michigan con tamaño de semilla chica, este último no presentó diferencia al compararlo en ambas condiciones hídricas (Figura 9C). Con respecto a la longitud del hipocotilo, esta variable presentó en el genotipo Sangre Maya con tamaño de semilla grande diferencias al igual que los genotipos Michigan y Bayo con tamaño de semilla chico en condiciones de humedad, seguido de los genotipos Michigan con tamaño de semilla chico y mediano en condiciones de estrés hídrico (Figura 9D).

En relación al ancho del epicotilo se vio afectado en la mayoría de los genotipos estudiados. Sin embargo, Sangre Maya con tamaño de semilla grande presentó el valor más alto (1.4 mm) seguido de Bayo con tamaño de semilla chica (1.3 mm) en condición de humedad. Al observar los genotipos Michigan y Bayo en condición de sequía con tamaño de semillas chicas y medianas respectivamente, no presentaron diferencias (Figura 9D). Para el ancho del hipocotilo no se encontró diferencia para el genotipo Sangre Maya con tamaño de semilla chico y grande en riego continuo, por el contrario, bajo condiciones de estrés hídrico el genotipo Michigan con semilla chica, obtuvo valores medios (Figura 9E). Reyes-Matamoros et al. (2014) plantean que la limitación de la humedad del suelo, influye en el cultivo del frijol, reduciendo el tamaño de la planta entre otros índices de crecimiento, como es la presencia de la hoja verdadera. Se ha señalado que las estructuras hipocotilo y epicotilo son más sensibles a los cambios de estrés hídrico y las altas temperaturas (Pereira *et al.*, 2013). Las condiciones de déficit hídrico, influyeron negativamente en el desarrollo del hipocótilo de los cultivares de frijol común utilizados. Por otro lado, se ha visto que dependiendo de la profundidad de siembra (10 cm) se pueden presentar valores altos en altura de plántula, diámetro de hipocotilo y biomasa acumulada esto para su emergencia sobre cualquier resistencia del terreno (Celis-Velázquez *et al.*, 2008). Pereira et al., (2013) sugiere dos respuestas de las semillas hacia el ambiente, que las plántulas de las semillas pequeñas tienen un mejor desarrollo del hipocotilo o que las plántulas provenientes de semillas grandes tienen una raíz con mayor longitud.

Al observar la altura de plántula, aunque esta fue afectada por las condiciones hídricas y altas temperaturas el genotipo Bayo con tamaño de semilla grande en condiciones de estrés hídrico mostró ser eficiente al obtener los valores más altos seguido del genotipo Michigan con tamaño de semilla chico, en condiciones de riego Sangre Maya con tamaño de semilla grande presentó los valores medios (Figura 9G). Los datos de la variable longitud de raíz muestran que el genotipo Sangre Maya con tamaño de semilla grande en condiciones de riego obtuvo valores significantes, seguido del genotipo Michigan y Bayo con tamaño de semilla chica, por el contrario no se encontró diferencia en el genotipo Michigan con tamaño de semilla chica y grande cuando se encuentra bajo riego y sequía respectivamente (Figura 9H). Esto quiere decir que los órganos subterráneos (raíz o radícula) de la planta se desarrollan más rápido que los órganos aéreos (tallo o hipocótilos), esto con el fin de lograr su aclimatización (Barrios-Gómez *et al.*, 2012). Sin embargo, al evaluar los diferentes genotipos de frijol estos respondieron de forma diferente ante el estrés, ya que cada uno tiene sus propios mecanismos que le confieren adaptabilidad a las condiciones de déficit hídrico y las altas temperaturas (Hucl, 1993).

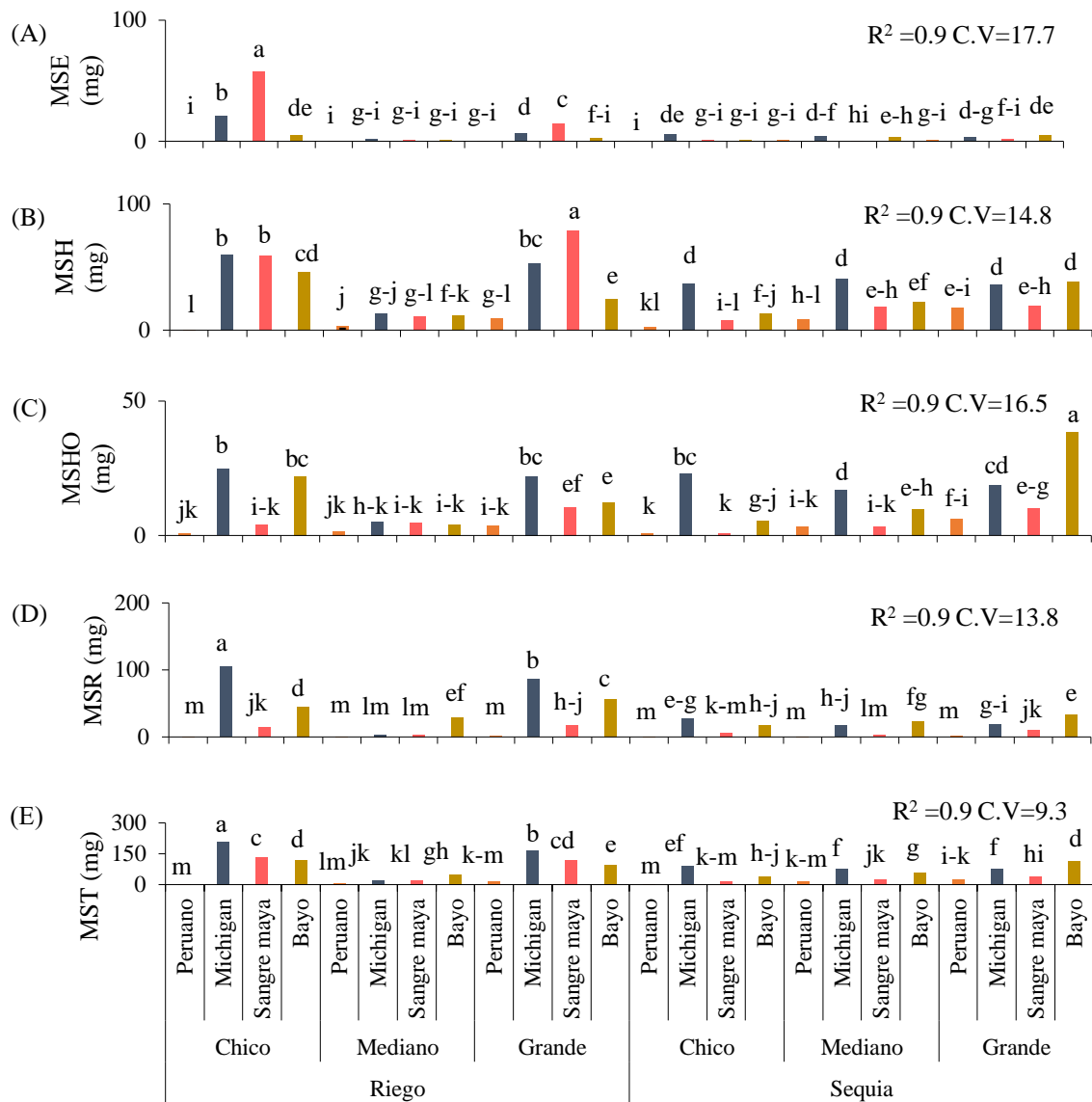


Figura 10. Comparación de medias con base a variables de frijol. MSE=materia seca epicotilo (mg); MSH=materia seca hipocotilo (mg); MSHO=materia seca hojas (mg); MSR=materia seca raíz (mg); MST=materia seca total (mg).

En cuestión de materia seca, la acumulación de esta en las primeras etapas es importante para la emergencia al existir una profundidad de siembra superior a la recomendada (5-6 cm). Esta se termina relacionando con el desarrollo del hipocotilo, tanto en la longitud como en su diámetro (Proctor y Sullivan, 2013). La materia seca del epicotilo se vio notoriamente afectado por los factores estrés hídrico, genotipo y el tamaño de la semilla. Al presentar los genotipos Sangre Maya seguido del genotipo Michigan valores altos, cuando se encuentran en riego y con el tamaño de semilla chica (Figura 10A). Se observó que en condiciones de

riego el genotipo Sangre Maya presento el valor más alto para la variable materia seca de hipocotilo con el tamaño de semilla grande, seguido de los genotipos Michigan y Sangre Maya con tamaño de semilla chica, no se encontraron diferencias para ambos genotipos (Figura 10B). Esto quiere decir que la acumulación de la materia seca en las plantas está relacionada con el grado de humedad del suelo debido al desencadenamiento de procesos adaptativos que traen una disminución marcada (Ojeda-Silvera *et al.*, 2015). La materia seca en hojas demostró resultados variados, siendo el genotipo Bayo con tamaño de semilla grande en condiciones de sequía el que obtuvo los valores altos.

Seguido del genotipo Michigan con tamaño de semilla chica en riego, a pesar de los resultados se observa que el genotipo Bayo en riego y tamaño semilla chica, el genotipo Michigan en riego y sequia con tamaño de semilla grande y chico respectivamente, no mostraron diferencias con respecto a esta variable (Figura 10C). Por otro lado, en la variable de materia seca de la raíz esta se vio afectada por el contenido de humedad, el genotipo al igual que el tamaño de semilla, observándose al genotipo Michigan con tamaño de semilla chica seguida por el mismo genotipo con el tamaño de semilla grande en condiciones de riego con valores significativos altos, estos resultados fueron iguales para la materia seca total (Figura 10D y 10E). Teng *et al.* (2023) explica que el efecto del estrés hídrico inhibe la actividad meristemática y como consecuencia la elongación y volumen de las raíces. Por otro lado, es factible suponer que, bajo déficit hídrico, existe la posibilidad de que la plántula es capaz de elegir entre un mayor desarrollo de la radícula en expensas del desarrollo del hipocótilo. tal evento puede ser una estrategia natural utilizada por las plántulas para buscar una fuente alternativa de agua (Pereira *et al.*, 2013).

Correlación

Al analizar las correlaciones entre las características de las plántulas de los diferentes genotipos de frijol bajo las condiciones de estrés hídrico y altas temperaturas los resultados indican que la altura de plántula, longitud del hipocotilo y epicotilo, longitud de raíz, materia seca hojas y materia seca raíz se correlacionan positivamente (Cuadro 2). Esto quiere decir, que las plántulas que tuvieron mayor altura desarrollaron valores altos en la longitud del hipocotilo y por lo tanto mayor materia seca en hojas. La longitud del hipocotilo está relacionada estrechamente con la longitud de la radícula y materia seca de hojas. De acuerdo con Celis-Velázquez *et al.* (2008) si el hipocótilo y la radícula fueran proporcionalmente afectados no se encontraría cambios estadísticos en la relación hipocótilo-raíz dentro de los diferentes tratamientos. Sin embargo, si hay una reducción de este valor esto significa que el hipocotilo ha tenido una reducción más pronunciada, por el contrario, si hay un aumento la raíz se vería afectado. Sin embargo, la correlación entre las longitudes de hipocótilo, radícula y plántula apuntan al hecho posible de mantener las proporciones en las medidas de plántulas. Este resultado se observó en el genotipo Sangre Maya con el tamaño de semilla grande en condiciones de riego, y el genotipo Michigan con tamaño de semilla chica en condiciones de riego y sequía.

Cuadro 2. Coeficiente de correlación entre las diferentes condiciones hídricas (riego y sequía) en cuatro genotipos de frijol.

	ALP	ANE	LONE	ANH	LONH	LONR	MSE	MSH	MSR	MSHO
ANE	0.75**									
LONE	0.78**	0.76**								
ANH	0.66**	0.71**	0.80**							
LONH	0.81**	0.74**	0.81**	0.79**						
LONR	0.61**	0.63**	0.80**	0.78**	0.85**					
MSE	0.21*	0.23**	0.31*	0.44**	0.39**	0.36*				
MSH	0.71**	0.66**	0.80**	0.76**	0.86**	0.82**	0.61**			
MSR	0.50**	0.36**	0.46**	0.39**	0.50**	0.47**	0.23*	0.59**		
MSHO	0.86**	0.56**	0.62**	0.48**	0.66**	0.46**	0.10 ^{ns}	0.61**	0.65**	
MST	0.70**	0.56**	0.69**	0.65**	0.76**	0.69**	0.57**	0.89**	0.86*	0.73**

**= $p \leq 0.01$; *= $p \leq 0.05$; ns= no significativo; ALP=altura de plántula; ANE=ancho epicotilo; LONE=longitud epicotilo; ANH= ancho hipocotilo; LONH=longitud hipocotilo; LONR=longitud raíz; MSE=materia seca epicotilo; MSH=materia seca hipocotilo; MSHO=materia seca hojas; MSR=materia seca raíz; MST=materia seca total.

Conclusión

Las altas temperaturas del aire y del suelo, más su combinación con el contenido de humedad del suelo y la profundidad de siembra, redujo el porcentaje de emergencia y las estructuras de la plántula de todos los genotipos y tamaños de semilla de frijol. Con semilla grande se obtuvo mayor capacidad de emergencia, elongación de epicotipo e hipocótilo y materia seca de la mayoría de las estructuras de la plántula para ambas condiciones de humedad. El genotipo Sangre Maya mostro un mayor comportamiento cuando el tamaño de semilla fue grande con base a condiciones de riego, seguido del genotipo Michigan con el tamaño de semilla chica al presentar una mayor adaptabilidad en condiciones de déficit hídrico. Se obtuvo una fuerte correlación entre el hipocotilo-raíz-biomasa total

Referencias

- Aikins, S. H. M., & Afuakwa, J. J. (2008). Growth and dry matter yield responses of cowpea to different sowing depths. *ARPJ Journal of Agricultural and Biological Science*, 3(5-6), 50-54.
- Amin, F., Ullah, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Hassan, S., Kumar, S., ... & Fahad, S. (2023). Hydrothermal time analysis of mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek seed germination at different water potential and temperatures. *South African Journal of Botany*, 157, 447-456.
- Balkaya, A. (2004). Modelling the effect of temperature on the germination speed in some legume crops. *Journal of Agronomy*, 3(3), 179-183.
- Barrios-Gómez, E. J., López-Castañeda, C., & Kohashi-Shibata, J. (2011). Relaciones hídricas y temperaturas altas en frijol del tipo “Flor de Mayo”. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 131-145.
- Barrios-Gómez, E. J., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J., Acosta-Gallegos, J. A., Miranda-Colín, S., Canul Ku, J., & Mayek-Pérez, N. (2012). Comparación de las estructuras morfológicas en raíz e hipocótilo en frijol. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(4), 655-669.
- Barros, J. R. A., Angelotti, F., SANTOS, J. D. O., SILVA, R. M. E., DANTAS, B., & MELO, N. F. D. (2020). Optimal temperature for germination and seedling development in cowpea seeds. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(2), 231-239.
- Baye, E., Ebrahim, Z., Kasahun, N., Wasyihun, N., Siyum, K., Yachiso, D., ... & Fekadu, B. (2020). Effects of planting depth on germination and growth of faba bean (*Vicia faba* L.) at fitche, oromia national regional state, Central Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 8(3), 58-63.
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Devi, M. J., & Polania, J. (2014). Common beans, biodiversity, and multiple stresses: challenges of drought resistance in tropical soils. *Crop and Pasture Science*, 65(7), 667-675.
- Blanco, J. W., & MONTES-R, C. O. N. S. U. E. L. O. (1993). The influence of temperature on seed germination in cultivars of common bean. *Journal of experimental botany*, 44(12), 1795-1800.
- Bravo-Delgado, H. R., Martínez, M. L. O., Loeza-Corte, J. M., & Díaz-López, E. (2021). Comportamiento ecofisiológico de tres cultivares de ejote *Phaseolus vulgaris* L. (Fabaceae) bajo un clima de transición templado a seco. *Tip Revista Especializada*

- Campo-Arana, R. O., & Burgos-Ayala, P. R. (2023). Efectos del tratamiento de semillas de frijol caupí *Vigna unguiculata* L. sobre el manejo de la marchitez vascular causada por *Scleroctium rolfsii*. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 25(3), 190-198.
- Caroca, R., Zapata, N., & Vargas, M. (2016). Temperature effect on the germination of four peanut genotypeS (*Arachis hypogaea* L.). *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 32(2), 94-101.
- Castiano, B. U. L., Kimurto, P. K., & Ojwang, P. P. O. (2023). Stability of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for root system architecture and seed yield in multi-environments. *Field Crops Research*, 293, 108863.
- Celis-Velázquez, R., Peña-Valdivia, C. B., Luna-Cavazos, M., Aguirre-Rivera, J. R., Carballo-Carballo, A., & Trejo-López, C. (2008). Variabilidad morfológica seminal y del vigor inicial de germoplasma mejorado de frijol. *Agronomía mesoamericana*, 19(2), 179-193.
- CONAGUA (Comisión nacional del agua). 2023. Servicio meteorológico nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> (Recuperado: noviembre 2023).
- Cruz-Suárez, S, A., Nápoles-García, M. C., & Morales-Guevara, D. (2022). El déficit hídrico en los cultivos y la acción de los microorganismos. *Cultivos Tropicales*, 43(3), cu-id.
- Domínguez, A. S., Hernández, Y. P., del Castillo, M. S., del Castillo, D. S., & Suárez, R. R. (2014). Efecto del estrés hídrico sobre la germinación de genotipos de frijol común en condiciones experimentales de sequía. *Avanzada Científica*, 17(1), 53-67.
- Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of experimental botany*, 67(3), 567-591.
- Flores, J. I. C., Moreno, M. T., Moreno, M. A. T., & Brito, J. E. C. (2017). Eficiencia y productividad del cultivo de frijol en un sistema de riego por bombeo en Zacatecas, México. *Ciencia Ergo Sum*, 24(2), 152-163. <https://doi.org/10.30878/ces.v24n2a7>
- Hucl, P. (1993). Effects of temperature and moisture stress on the germination of diverse common bean genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*, 73(3), 697-702.

- ISTA (International Rules for Seed Testing). (2023). <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html> (Recuperado: diciembre 2023).
- Kazai, P., Noulas, C., Khah, E., & Vlachostergios, D. (2019). Yield and seed quality parameters of common bean cultivars grown under water and heat stress field conditions. *AIMS Agriculture & Food*, 4(2).
- León-Rojas, G. I., Rodríguez-Soto, C., & Padilla-Loredo, S. (2020). La conservación in situ del frijol criollo: construyendo soberanía alimentaria en el sureste del Estado de México. *Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana*, (9), 125-141.
- Ligarreto, G. A., Castro, O. A., & Cháves, B. (2015). Estabilidad fenotípica de una colección de fríjol andino (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo arbustivo. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 109-118.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. DOI: [10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x](https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x)
- Maldonado, C., PUJADO, E., & SQUEO, F. A. (2002). El efecto de la disponibilidad de agua durante el crecimiento de *Lycopersicon chilense* sobre la capacidad de sus semillas para germinar a distintas temperaturas y concentraciones de manitol y NaCl. *Revista chilena de historia natural*, 75(4), 651-660.
- Maqueira-López LA, Roján-Herrera O, Solano-Flores J, Milagros-Santana I. 2021. Germinación de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a diferentes temperaturas. *Cultivos Tropicales* 42 (2): 03. <https://doi.org/10.1234/ct.v42i2.1587>
- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G., & Zarazúa Villaseñor, P. (2016). Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE13), 2465-2474.
- Mendoza R, M. F., Veitía, N., Martirena-Ramírez, A., Rojas, L. E., Torres, D., Hernández, S., & Rivero, L. (2020). Respuesta diferencial de tres cultivares de *Phaseolus vulgaris* L. al estrés hídrico in vitro inducido por PEG-6000. *Biotecnología Vegetal*, 20(4), 351-359.
- Morales-Santos, M. E., Peña-Valdivia, C. B., García-Esteva, A., Aguilar-Benítez, G., & Kohashi-Shibata, J. (2017). Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie. *Agrociencia*, 51(1), 43-62.

- Neto, N. B. M., Prioli, M. R., Gatti, A. B., & Cardoso, V. J. M. (2006) Temperature effects on seed germination in races of common beans (*Phaseolus vulgaris* Phaseolus vulgaris L.). *Acta Scientiarum. Agronomy*. Maringá, v. 28, n. 2, p. 155-164
- Ojeda-Silvera, C. M., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéquez, E., Ruíz-Espinoza, F. H., & García-Hernández, J. L. (2015). Emergencia y crecimiento de plántulas de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) sometidas a estrés hídrico. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(5), 151-161.
- Padilha, M. S., COELHO, C., MEDEIROS, M., & ANDRADE, G. C. D. (2020). Seed reserve mobilization evaluation for selection of high-vigor common bean cultivars. *Revista Caatinga*, 33, 927-935.
- Pérez-Iriarte, C., Sánchez-Delgado, M., Razuri-Ramírez, L., & Enciso-Gutiérrez, A. (2021). Dosis de riego y coeficiente del cultivo (Kc) en la producción del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en Lima, Perú. *Revista Ingeniería UC*, 28(3), 349-359.
- Pereira, W. A., Pereira, S. M. A., & Dias, D. C. F. D. S. (2013). Influence of seed size and water restriction on germination of soybean seeds and on early development of seedlings. *Journal of Seed Science*, 35, 316-322.
- Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J. A., & Yáñez-Chávez, L. G. (2016). Evaluación de tres variedades de frijol pinto bajo riego y sequía en Durango, México. *Agronomía Mesoamericana*, 167-176.
- Pinedo-Taco, R., Figueroa-Serrudo, C., & Alvarado-Huamán, L. (2022). Water Stress, Heat, and Salinity in the Physiological Quality of the Seeds. In *Seed Biology Updates*. IntechOpen.
- Proctor, J. T., & Sullivan, J. A. (2013). Effect of seeding depth on seedling growth and dry matter partitioning in American ginseng. *Journal of Ginseng Research*, 37(2), 254.
- Rosabal Ayan, L., Martínez González, L., Reyes Guerrero, Y., Dell'Amico Rodríguez, J., & Núñez Vázquez, M. (2014). Aspectos fisiológicos, bioquímicos y expresión de genes en condiciones de déficit hídrico. Influencia en el proceso de germinación. *Cultivos Tropicales*, 35(3), 24-35.
- Reyes-Matamoros, J., Martínez-Moreno, D., Rueda-Luna, R., & Rodríguez-Ramírez, T. (2014). Efecto del estrés hídrico en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de invernadero. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(2), 191-203.

- Rosas, J. C., Rodriguez, I. Y., Beaver, J. S., & Porch, T. G. (2023). Comportamiento agronómico de germoplasma de frijol común en condiciones de altas temperaturas en el Sur de Honduras. *Ceiba*, 56(1), 31-49.
- Rosabal Ayan, L., Martínez González, L., Reyes Guerrero, Y., Dell'Amico Rodríguez, J., & Núñez Vázquez, M. (2014). Aspectos fisiológicos, bioquímicos y expresión de genes en condiciones de déficit hídrico. Influencia en el proceso de germinación. *Cultivos Tropicales*, 35(3), 24-35.
- Rodriguez, I. Y., Porch, T., Beaver, J., & Sotomayor, J. C. R. (2021). Evaluación fenotípica de frijol tépari (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) bajo condiciones de estrés de sequía y altas temperaturas. *CEIBA*, (Edición Zamorano Investiga), 52-64.
- Ruscitti, M. F., Arango, M. C., Ronco, M. G., Peluso, O., & Beltrano, J. (2007). Efecto del estrés hídrico simulado y la inoculación con esporas de *Glomus mosseae* sobre el crecimiento y la partición de biomasa en avena. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 135-143.
- SAS (SAS institute). 2009. https://www.sas.com/es_mx/learn/academic-programs/software.html (Recuperado: noviembre 2023).
- Suárez, D., Melgarejo, L. M. (2010). Biología y germinación de semillas. Experimentos en fisiología vegetal, 13-25.
- Souza, M. L., & Fagundes, M. (2014). Seed size as key factor in germination and seedling development of *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 2014.
- Steiner, F., Zuffo, A. M., Busch, A., Sousa, T. D. O., y Zoz, T. (2019). Does seed size affect the germination rate and seedling growth of peanut under salinity and water stress?. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 49.
- Teng, Z., Lyu, J., Chen, Y., Zhang, J., & Ye, N. (2023). Effects of stress-induced ABA on root architecture development: Positive and negative actions. *The Crop Journal*, 11(4), 1072-1079.
- Tosquy Valle, O. H., López Salinas, E., Zetina Lezama, R., Villar Sánchez, B., & Rodríguez Rodríguez, J. R. (2017). Producción de genotipos de frijol negro en condiciones de humedad residual y sequía terminal. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 29-39.
- Vargas, Y., Mayor-Duran, V. M., Buendia, H. F., Ruiz-Guzman, H., & Raatz, B. (2021). Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *PLoS One*, 16(4), e0249859.

Vidak, M., Lazarević, B., Javornik, T., Šatović, Z., & Carović-Stanko, K. (2022). Seed water absorption, germination, emergence and seedling phenotypic characterization of the common bean landraces differing in seed size and color. *Seeds*, 1(4), 324-339.

8. Conclusión

Los factores abióticos como el estrés hídrico y las altas temperaturas durante la etapa de reproductiva del cultivo (prefloración y floración) redujo drásticamente el crecimiento y desarrollo del frijol y resulto en una variación de la transpiración y temperatura del dosel. Asimismo, una reducción del número de trifolios, botones florales, vainas y producción de biomasa total de los genotipos de frijol. Las variedades Sangre Maya y San Luis presentaron menor efecto del estrés hídrico y altas temperaturas, al obtener mayor regulación de la transpiración y temperatura del dosel, y obtener mayor altura de planta, biomasa seca total y número de trifolios, botones y vainas por planta. Se obtuvo una fuerte asociación entre la altura de planta-biomasa seca total, número de trifolios y vainas por planta entre los genotipos.

En la etapa temprana, las semillas de frijol se vieron afectadas por las altas temperaturas registradas, tanto del aire como del suelo esto en combinación del contenido de humedad, provocando la reducción de la emergencia y las estructuras en desarrollo de las plántulas de frijol cuando son sembradas a una profundidad de 15 cm, esto en relación al genotipo y tamaño de semilla. Resultando en una variación en la longitud de la raíz y del ancho y longitud de hipocotilo y epicotilo. Asimismo, se vio demostrada la afectación en el porcentaje y velocidad de emergencia, altura de plántula y materia seca total en todos los genotipos de frijol. El genotipo Sangre Maya mostro un mayor comportamiento en riego con tamaño de semilla grande, seguido del genotipo Michigan con el tamaño de semilla chica al presentar una mayor adaptabilidad en condiciones de déficit hídrico. Se obtuvo una fuerte correlación entre el hipocotilo, raíz y biomasa seca total.

9. Anexos

