



Instituto Tecnológico de China

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE **INGENIERO**
AGRONOMO

PRESENTA:

C. CHULIN CACH ELEAZAR ABISAI

ASESOR INTERNO:

DRA. MONICA BEATRIZ LOPEZ HERNANDEZ

TÍTULO:

**“RENDIMIENTO DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) BAJO DIFERENTES TIPOS
DE FERTILIZACIÓN”**

MARZO 2023



AGRADECIMIENTOS

A **Dios** primeramente por ser nuestra guía y por permitirnos cumplir una meta más en la vida.

Al **Instituto Tecnológico de Chiná** y al laboratorio de biotecnología vegetal por el apoyo y las facilidades otorgadas durante nuestra estancia profesional. A cada uno de los maestros que con su ayuda y conocimientos participaron en nuestro desarrollo profesional durante nuestros estudios.

A la **Dra. Mónica Beatriz López Hernández** por asesorarme y por compartir sus experiencias profesionales. A cada uno de nuestros asesores le agradecemos los consejos, apoyo, paciencia, dedicación y la disposición de tiempo para asesorarnos en nuestro trabajo de investigación.

Agradecemos a nuestros padres y hermanas, por motivarnos, aconsejarnos y sobre todo apoyarnos para poder concluir con nuestros estudios.

A la familia Yes Noh por brindarnos las instalaciones para poder llevar a cabo nuestro diseño experimental.



DEDICATORIAS

A:

Dios por permitirnos cumplir un sueño más en la vida, por darnos salud para lograr alcanzar una meta más y sobre todo por su infinito amor.

A nuestros padres y hermanas por ser el sostén fundamental en el transcurso de nuestras vidas gracias por estar presentes en el desarrollo profesional, por su incondicional cariño y apoyo.

A nuestros compañeros de clases, pero especialmente a nuestros amigos con los que compartimos momentos inolvidables, experiencias escolares, quienes vivieron de cerca nuestros triunfos y fracasos, a los profesores que nos brindaron las herramientas necesarias y adecuadas para que pudiéramos ser buenos alumnos.



RESUMEN

El 60% de la producción mundial de frijol se obtiene bajo condiciones de déficit de hídrico, lo que ha llevado a considerar a la sequía como el segundo factor limitante para su rendimiento, después de las enfermedades. En los últimos cinco años (2016-2020) la superficie promedio sembrada en Campeche es de alrededor de 1,900 hectáreas y básicamente la producción que se genera es en condiciones de temporal, donde año con año el rendimiento es afectado por los temporales raquíuticos y sequia intermitente. Por lo que es importante contar con variedades promisorias con un buen comportamiento agronómico y tolerantes al estrés hídrico. En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo la evaluación de materiales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo estrés hídrico en el estado de Campeche, México. Para ello se estableció un experimento bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones en un arreglo factorial 4 x 4, correspondiente a tres tratamientos de sequía y uno de riego para los dos cultivares en octubre del 2021 en el Instituto Tecnológico de Chiná de la localidad de China, Campeche, Camp., México. Se utilizó cuatro genotipos: Tacana, Comapa, Jamapa, Veracruz 8025. La aplicación del estrés hídrico se realizó al iniciar la etapa reproductiva de cada variedad. Los resultados mostraron que la restricción de humedad en la etapa vegetativa afectó de forma diferencial las estructuras de la planta en las cuatro variedades de frijol negro. Por ejemplo, el efecto del estrés hídrico no afectó a las variedades Tacana y Jamapa, con acepción la variedad Comapa, que numéricamente redujo la altura de planta (ALP) en un 6 % y en un 11 % a la variedad 8025 en comparación con las plantas con riego. El estrés hídrico afectó el desarrollo de hojas en la planta de frijol, al reducir en la variedad Jamapa y Comapa tres hojas y en Tacana dos hojas, con acepción de la variedad 8025 donde se desarrollaron seis hojas para ambas modalidades de humedad. La



intensidad de la sequía redujo en un 28 % el número de vainas por planta en la variedad de frijol negro 8028. Mientras que en la variedad Tacana el número de vainas se redujo en un 25 %. En cuanto a las variedades Jamapa y Comapa el efecto de la sequía fue de 15 %. También el estrés hídrico afectó negativamente la formación de semillas por planta en un 17 %, que equivale a un promedio de 10 semillas por planta en cada variedad de frijol. En relación al efecto del estrés hídrico por variedad, la intensidad de la sequía redujo el número de semillas por planta en un 13 % para Jamapa, 17 % para Comapa y 23 % para 8025, con excepción de Tacaná que no sufrió cambios. El estudio mostro que el estrés hídrico no afectó la producción de materia seca de raíz en las variedades; sin embargo, numéricamente podemos mencionar que el déficit hídrico en promedio redujo 7.5 % el peso seco de raíz de todas las variedades de frijol. Mientras que, de forma individual por variedad, la sequía redujo numéricamente el peso seco de raíz en un 6 % para Comapa, 14 % sobre Tacaná y 17 % para 8025. El estrés aplicado a todas las variedades de frijol en etapa reproductiva aumento numéricamente el peso seco de tallo y hojas en un 3 % y 1 % en vainas y biomasa total. Las plantas provenientes de todas las variedades de frijol con y sin déficit hídrico mostraron un comportamiento similar en la elongación de la raíz cuando la sequía se aplicó en la etapa reproductiva. Sin embargo, el estudio mostro que numéricamente cuando las plantas con y sin estrés hídrico la variedad Comapa superó en un 2 % a la variedad Tacaná, 3 % a Jamapa y con 6 % sobre 8025

Palabras calve: variedades de frijol, restricción de humedad y etapa fenológica.



CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS	ii
RESUMEN	iii
INDICE DE CUADROS.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
III. HIPÓTESIS.....	3
IV. REVISION DE LITERATURA.....	4
V. MATERIALES Y METODOS	42
5.1 Localización del diseño experimental	42
5.2 Material genético	42
5.3 Detalle experimental.....	44
5.4 Manejo del experimento	45
5.5 Variables medibles	46
5.6 Análisis estadístico	47
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
6.1.1. Comportamiento de la temperatura	48



VIII. RECOMENDACIONES.....	75
IX. BIBLIOGRAFIA.....	75

BORRADOR



INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Procedencia de las accesiones nativas de frijol nativo colectado durante 2020-20121. Península de Yucatán, México.	42
---	----



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Monitoreo de sequía en México al 15 de agosto de 2019.....¡Error!
Marcador no definido.

Figura 2. Monitoreo de sequía en México al 15 de agosto de 2020.....¡Error!
Marcador no definido.

Figura 3. Monitoreo de sequía en México al 15 de septiembre de 2019.....38

Figura 4. Monitoreo de sequía en México al 30 de septiembre de 2019.....38

Figura 5. Monitoreo de sequía en México al 15 de septiembre de 2020.....38

Figura 6. Monitoreo de sequía en México al 30 de septiembre de 2020.....38

Figura 7. Monitoreo de sequía en México al 15 de octubre de 2019.¡Error!
Marcador no definido.

Figura 8. Monitoreo de sequía en México al 31 de octubre de 2019.¡Error!
Marcador no definido.

Figura 9. Monitoreo de sequía en México al 15 de octubre de 2020.¡Error!
Marcador no definido.

Figura 10. Monitoreo de sequía en México al 31 de octubre de 2020.¡Error!
Marcador no definido.

Figura 11. Panorámica del experimento de materiales nativos de frijol bajo estrés hídrico 2021. Chiná, Campeche, Camp., México.....44

Figura 12. Hormigas en botones florales de planta de lbe.¡Error! **Marcador no definido.**

Figura 13. Mosca minadora de la hoja en la planta de frijol carita.¡Error! **Marcador no definido.**



Figura 14. Aplicación de insecticida.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Aplicación de fertilizante.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Comportamiento de la temperatura durante el ensayo de accesiones de frijol bajo condiciones de estrés hídrico en 2021. China, Campeche, Camp., México..	
.....	48
Figura 17. Altura de planta de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego durante diez días en el estado de Campeche, Camp., México.....	56
Figura 18. Altura de planta de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Altura de planta de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego por treinta días en el estado de Campeche, Camp., México.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20. Altura de planta de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 21. Número de hojas trifoliadas de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego durante diez días en el estado de Campeche, Camp., México..	
.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 22. Número de hojas trifoliadas de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México..	
.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 23. Número de hojas trifoliadas de la accesión de frijol carita e Ibe bajo estrés hídrico y riego por treinta días en el estado de Campeche, Camp., México ..	¡Error! Marcador no definido.



Figura 24. Número de hojas trifoliadas de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 25. Número de botones florales de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 26. Número de botones florales de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México..
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 27. Número de botones florales y botones por planta de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México..
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 28. Número de flores de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 29. Número de flores de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 30. Número de días a floración y flores por planta de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México.
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 31. Número de vainas por planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México).
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 32. Número de vainas por planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México.
..... ¡Error! Marcador no definido.



Figura 33. Número de vainas por planta de la accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México; **Error! Marcador no definido.**

Figura 34. Número de vainas después de aplicar el riego de recuperación en Sequia 1 en la accesión de Frijol Carita e lbe a los 138 dds. Campeche, Camp., México..
..... **Error! Marcador no definido.**

Figura 35. Número de vainas después de aplicar el riego de recuperación en Sequia 2 en la accesión de Frijol Carita e lbe a los 138 dds. Campeche, Camp., México..
..... **Error! Marcador no definido.**

Figura 36. Número de vainas después de aplicar el riego de recuperación en Sequia 3 en la accesión de Frijol Carita e lbe a los 138 dds. Campeche, Camp., México
..... **Error! Marcador no definido.**

Figura 37. Peso seco de vainas después de aplicar el riego de recuperación en Sequia 1 en la accesión de Frijol Carita e lbe a los 138 dds. Campeche, Camp., México. **Error! Marcador no definido.**

Figura 38. Peso seco de vainas después de aplicar el riego de recuperación en Sequia 2 en la accesión de Frijol Carita e lbe a los 138 dds. Campeche, Camp., México. **Error! Marcador no definido.**

Figura 39. Peso seco de vainas después de aplicar el riego de recuperación en Sequia 3 en la accesión de Frijol Carita e lbe a los 138 dds. Campeche, Camp., México. **Error! Marcador no definido.**

Figura 40. Número de vainas completas por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante diez días en el estado de Campeche, Camp., México..... **Error! Marcador no definido.**

Figura 41. Número de vainas completas por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol



carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 42. Número de vainas completas por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 42 Número de vainas vanas por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante diez días en el estado de Campeche, Camp., México..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 43. Número de vainas vanas por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México.)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 44. Número de vainas vanas por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 45. Peso seco de vaina por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante diez días en el estado de Campeche, Camp., México **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 46. Peso seco de vaina por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de accesión de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México.. **¡Error! Marcador no definido.**



Figura 47. Peso seco de vaina por extractos (A=superior de la planta; B=intermedia de la planta; C=inferior de la planta) de la planta de acceso de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 48. Peso seco de biomasa por planta de acceso de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante diez días en el estado de Campeche, Camp., México. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 49. Peso seco de biomasa por planta de acceso de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante veinte días en el estado de Campeche, Camp., México. México.. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 50. Peso seco de biomasa por planta de acceso de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante treinta días en el estado de Campeche, Camp., México. México.. ¡Error! Marcador no definido.

Figura 51. Peso seco de biomasa por planta de acceso de frijol carita e lbe bajo estrés hídrico y riego durante diez, veinte y treinta días en el estado de Campeche, Camp., México. México..... ¡Error! Marcador no definido.

I. INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico es uno de los principales estreses abióticos que limitan la producción de cultivos en muchas regiones tropicales y subtropicales (Atta, *et al.*, 2013) y determinan la producción agrícola de secano (Li, *et al.*, 2009). Hay indicios de que el riesgo de sequía aún puede aumentar con el cambio climático esperado en áreas propensas a la sequía (IPCC, 2014). Se ha observado un aumento en la intensidad, duración y área afectada por la sequía en áreas tropicales y subtropicales desde la década de 1970 (Dai, *et al.*, 2004). En estas regiones, un aumento en la temperatura del aire y una disminución en la precipitación han contribuido a mejorar las condiciones secas, ejerciendo una presión adicional sobre los sistemas agrícolas (Ericksen, 2008).

En el estado de Campeche, de 2016 a 2020 se sembraron en promedio 1,900 ha de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (SIAP, 2016-2020). El 100 % de la superficie cultivada con esta leguminosa, es sembrada en el ciclo de primavera-verano en condiciones de temporal, cuya producción depende en gran parte de las escasas lluvias que ocurren durante la etapa vegetativa y reproductiva del cultivo y de la humedad residual almacenada en el suelo, observándose con frecuencia sequía terminal, la cual se presenta antes y después de la floración, durante las etapas de llenado de vainas y madurez fisiológica (Acosta-Gallegos *et al.*, 1998).

Diversos autores(as) coinciden en afirmar que, en términos de rendimiento, el frijol es más sensible al estrés hídrico durante la etapa reproductiva del cultivo, que, en las fases vegetativas, debido al incremento en la demanda de asimilados por las estructuras reproductivas (Manjeru *et al.*, 2007). La falta de humedad durante esta etapa, provoca aborto de flores, disminución de componentes de rendimiento e impide que la planta exprese su potencial productivo (Ghassemi-Golezani y Mardfar, 2008). Por otra parte, dependiendo de la duración y magnitud de la sequía, la capacidad del suelo para almacenar agua para la raíz, las condiciones atmosféricas que influyen en la tasa de evapotranspiración y de la constitución genética del



cultivar, puede ocasionar pérdidas de 20 o hasta 100% en el rendimiento de frijol (Castañeda *et al.*, 2006).

Ente la problemática planteada anteriormente indica la necesidad de disponer de variedades de frijol tolerantes o resistentes a la sequía terminal, para disminuir los efectos negativos de este factor abiótico en las siembras de humedad residual (Frahm, *et al.*, 2003). La evaluación de variedades bajo condiciones de riego y con estrés hídrico en la etapa reproductiva del cultivo, en combinación con la utilización de variables de selección, es una metodología que ha resultado en la identificación de variedades promisorias, en el proceso de mejoramiento genético para resistencia a sequía en esta especie (Schneider, *et al.*, 1997). Para una selección efectiva, se ha propuesto basar ésta, en variables que permita identificar variedades con alta eficiencia en el rendimiento de grano en ambas condiciones de humedad y otro que permita seleccionar aquellos, cuyo rendimiento muestre menor reducción en condiciones de secano (Rosales-Serna, *et al.*, 2000).

En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo la evaluación de materiales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo estrés hídrico en el estado de Campeche, México con el propósito de coadyuvar a la problemática que aqueja a miles de productores del estado de Campeche.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Estudiar la variabilidad genética de e ibe (*Phaseolus lunatus* L.) en aspectos de fenología, biomasa parte aérea y raíz, pesos seco y rendimiento de semilla y sus componentes bajo condiciones de riego y sequia antes, durante y después de la floración.

2.2. Objetivos específicos

1. Estudiar la variabilidad genética en rendimiento y sus componentes, y fenología del cultivo en condiciones de riego y sequía antes, durante y después de la floración en el ciclo de otoño-invierno.
2. Estudiar la variabilidad en acumulación de biomasa y peso seco de parte aérea y raíz en condiciones de riego y sequía antes, durante y después de la floración en el ciclo de otoño-invierno.

III. HIPÓTESIS

Ho. 1. Los materiales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) son iguales en cuanto a características agronómicas, productivas y sus componentes bajo estrés hídrico.



Ha. 2. Los materiales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) son diferentes en cuanto en cuanto a características agronómicas, productivas y sus componentes bajo estrés hídrico.

IV. REVISION DE LITERATURA

4.1. Origen del frijol

América Latina es la principal región productora de frijol en el mundo y representa casi la mitad de la producción mundial. Se conoce que México es el centro de domesticación y diversidad de genes en plantas de frijol (Gepts y Bebouch, 1991). El Centro Internacional de Agricultura Tropical, (1983) menciona que en México los restos arqueológicos encontrados de frijol en Rio Zape, Durango tienen 1300 años de antigüedad. En Ocampo Tamaulipas se encuentran especímenes entre 4300 y 6000 años de antigüedad, en el caso de la cueva de Coxcatlan, Valle de Tehuacán, Puebla se encuentran especímenes de más de 7000 años.

Alrededor de 9000 y 5000 años a.C. en todo el mundo comenzó la domesticación de especies vegetales incluidos el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) el centro de origen y de domesticación de *P. vulgaris* además de fuente primaria de poblaciones con genes de utilidad para mejoramiento genético con el fin de entender cómo ha evolucionado, diversificado y a la vez conservar la especie, alude (Hernández-López et al., 2013). De acuerdo con los restos fósiles y características morfológicas, agronómicas y genéticas, afirman que el origen del frijol se encuentra en Mesoamérica y fue domesticado alrededor de 5000 y 2000 años a.C. en México-Centroamérica y Sudamérica (los Andes).

En México se han encontrado variedades silvestres de *P. vulgaris* en exploraciones botánicas, que viven en la Sierra Madre Occidental, entre 500 y 1800 msnm. En la misma Sierra Madre Occidental crecen diferentes especies de *Phaseolus*, teniendo una diversidad genética, tanto de frijol como organismos que dañan al frijol (Miranda, 1967).



Linnaeus (1753) consideraba la especie de *P. vulgaris* L. como origen asiático, luego De Candolle (1886), consideró por escritos griegos que el frijol provenía de Asia Occidental, poco tiempo después Wittmack en Perú encontró en excavaciones semillas de *P. vulgaris* y *P. lanatus* L. Años más tarde Vavilov (1949) y Bucasov ., (1931) al estudiar variedades de frijol de México, Guatemala, Colombia, Perú, Chile y Bolivia, se afirmó que México-Guatemala es el centro de diversificación de frijol. Gepts y Debouck, (1991) reafirman que desde el siglo XIX se sabe que el origen del frijol es americano, gracias a observaciones que se realizaron a restos arqueológicos que van desde Perú hasta el suroeste de Estados Unidos. Kaplan y Lynch, (1973) indican que se descubrió restos arqueológicos en los Andes, América Central y América del Norte como: semillas, restos de vainas hasta plantas enteras. La domesticación del frijol común sucede en regiones de América Latina hace más de 7,000 años, Se identifican dos centros de origen por patrones arqueológicos, agronómicos, proteínas y semillas (Kaplan, 1965). La división entre dos centros de origen proviene de la hibridación entre representantes de cada grupo (Singh y Gutiérrez, 1984). En estudios realizados reiteran la forma del frijol silvestre encontradas en regiones de montaña de México y Sudamérica. Es muy probable que en cada región hubo domesticación de frijol, originando cambios como el tamaño o color de la semilla a través de la introgresión de *Phaseolus coccineus* (Miranda, 1967). Entonces el esparcimiento que va de los centros de origen andino y mesoamericano siguió diferentes rutas o más probable hay una intensa introgresión de germoplasma (Paredes y Gepts 1995)

4.2. Diversidad genética de frijol

México es centro de diversidad del frijol. En el país se reportan 70 especies de 150; de las cuales, cinco han sido domesticadas y pueden encontrarse en su forma silvestre y cultivada, de acuerdo con investigaciones de la Red frijol del SNICS (SNICS, 2016).



El frijol (*Phaseolus* sp.) forma parte de la dieta de un gran número de personas y su cultivo se ha extendido prácticamente a todos los lugares susceptibles de permitir su desarrollo. Tiene un aporte nutrimental importante en proteína, carbohidratos, lípidos, hierro y calcio (Lépiz, 2007).

Mesoamérica cuenta con la mayor variabilidad genética del género. En la región occidente de México se desarrolló la domesticación del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Actualmente, se reportan 70 especies de las 150 existentes a nivel mundial; cinco, han sido domesticadas y es posible hallarlas en su forma silvestre y cultivada: *P. vulgaris* L. (frijol común), *P. coccineus* A. Gray (frijol ayacote), *P. lunatus* L. (frijol lima), *P. acutifolius* A. Gray (frijol tepary) y *P. dumosus* Mac Fady (frijol acalete).

La forma cultivada de frijol se siembra en todos los estados del país y representa más del 95 % del frijol que se consume en México. De ahí, la importancia de su cultivo y diversidad. El uso del frijol en la gastronomía mexicana es sumamente característico en sabor, variedad de platillos y como acompañante de cualquier degustación típica. El banco de germoplasma de frijol del INIFAP en el estado de México contiene más de 7000 registros de frijol cultivado, pero, hay pocas variedades silvestres almacenadas (Vargas, *et al.*, 2006). En bancos de germoplasma internacionales existen 83000 entradas almacenadas, pero sólo el 2 % son silvestres.

4.3. Tipos de evidencias de domesticación del frijol

En frijol la domesticación redujo la diversidad genética por un fenómeno denominado “cuello de botella de la domesticación”, que consiste en la reducción de la diversidad genética de la población en comparación con su ancestro, debido al pequeño número de individuos que fundaron las poblaciones domesticadas (efecto fundador) (Ladizinsky, 1998), y la posterior selección con base en características particulares que redujeron aún más la diversidad genética de loci específicos y regiones genómicas circundantes (Papa *et al.*, 2006). Para determinar



el origen y la domesticación de las plantas suelen utilizarse cuatro tipos de evidencias, de acuerdo con de Candolle (1882) (citado por Gepts, 1999). Éstas son las arqueológicas (más específicamente arqueobotánicas); las botánicas (por ejemplo, la distribución de las especies silvestres o de sus parientes ancestrales); las históricas (la existencia de registros escritos que documentan la importancia o existencia del cultivo); y las lingüísticas (por ejemplo, la existencia de palabras que designen el cultivo o conceptos relacionados con el cultivo en lenguaje autóctono). El género *Phaseolus* incluye cinco especies domesticadas: *P. vulgaris* (frijol común), *P. lunatus* (frijol lima), *P. acutifolius* (frijol tépari), *P. coccineus ssp. coccineus* (frijol ayocote) y *P. dumosus* = *P. polyanthus* (= *P. coccineus ssp. darwinianus*) (frijol de año) (Freitag y Debouck, 2002). Los primeros trabajos sobre el origen y evolución del frijol se remontan a Miranda-Colín (1967) y Gentry (1969), quienes afirmaron que la forma silvestre de frijol se encuentra en Mesoamérica. Posteriormente, se han propuesto centros de origen y domesticación alternativos que trabajos sucesivos han ratificado o rectificado (Kwak *et al.*, 2009).

El frijol común comprende dos acervos genéticos, el Mesoamericano y el Andino, que difieren en sus estructuras y niveles de diversidad genética, tanto en poblaciones silvestres como en las domesticadas. La mayor diversidad del germoplasma Mesoamericano se fundamenta en sus mayores proporciones del componente de varianza interpoblacional y diferenciación genética en el germoplasma domesticado (Papa y Gepts, 2003). En parte esto se debe a que poblaciones de germoplasma Mesoamericano de *P. vulgaris* son simpátricas con otras especies sexualmente compatibles como *P. coccineus*, lo que puede provocar hibridación interespecífica o introgresiva. Otros factores que afectan los niveles de diversidad son el aislamiento reproductivo parcial entre acervos genéticos, la homoplasia y la evolución convergente, aunque permanecen sin estudiarse a fondo (Papa *et al.*, 2006). En los últimos años se ha demostrado que la información generada mediante la aplicación de herramientas de marcadores moleculares de

ADN ha incrementado el entendimiento sobre la diversidad genética y el proceso de domesticación del frijol común (Mensack *et al.*, 2010).

El reciente desarrollo de técnicas como los marcadores microsatélites y de secuencias de etiquetas sencillas en ADN cloroplástico y mitocondrial, así como la de secuenciación del genoma, ayudarán en la identificación de las rutas de migración del frijol en el mundo y permitirán distinguir el papel evolutivo de la selección, deriva y migración. Al respecto, se debe tener en cuenta que fuerzas como la migración y la deriva afectan loci distribuidos a través del genoma, mientras que la selección sólo afecta loci específicos debido a la recombinación (Bitocchi *et al.*, 2013).

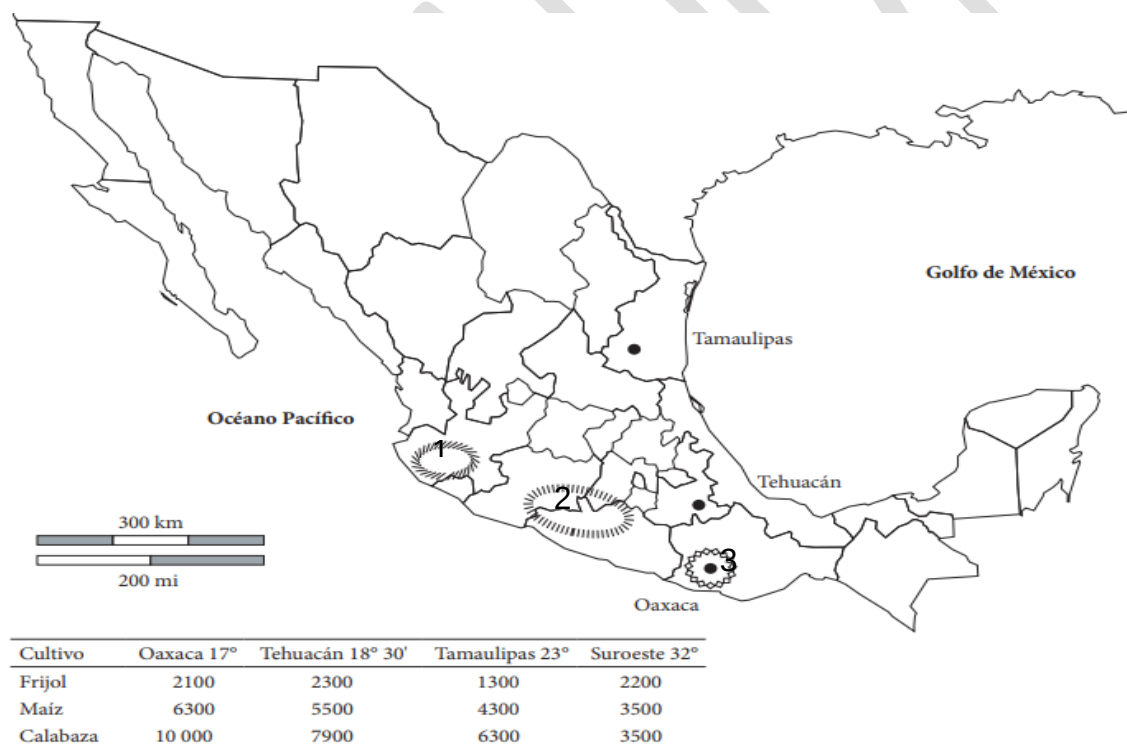


Figura 1. Mapa de México que muestra las áreas geográficas de domesticación de frijol común (1), maíz (2) y calabaza (3), así como la ubicación aproximada de las cuevas de Ocampo, Tamaulipas; Tehuacán, Puebla y Guilá Naquitz, Mitla, Oaxaca (Kwak *et al.*, 2009). El cuadro inferior indica las latitudes de los sitios y las fechas de domesticación del frijol, maíz y calabaza

4.4. Información taxonómica

Taxonómicamente, el frijol corresponde a la especie del género *Phaseolus*. Su nombre completo es *Phaseolus vulgaris* L., asignada por Linneo en 1753, a la tribu *Phaseoleae*, subfamilia *Papilionoideae*, familia *Leguminosae* y al orden Rosales (Armando, *et al.*, 2011).

4.5. Etapas de desarrollo de la planta de frijol

a) Fase vegetativa (V). La fase vegetativa comprende desde el inicio de la germinación hasta el momento de la o los primeros racimos en las variedades de crecimiento indeterminado y consta de las cinco etapas siguientes: germinación, emergencia, hojas primarias, primera hoja trifoliada, tercera hoja trifoliada (Fernández, *et al.*, 1986).

V2. Hojas primarias (unifoliadas y compuestas) están desplegadas.

V3. Primera hoja trifoliolada. Se inicia cuando la planta presenta la primera hoja trifoliolada completamente abierta y las láminas de los folíolos se ubican en un plano.

V4. Tercera hoja trifoliolada. Cuando la tercera hoja trifoliolada se encuentra desplegada.

b). Fase reproductiva (R). La fase reproductiva inicia en el momento de la diferenciación de las yemas florales, termina cuando la semilla completa su desarrollo. Comprende las siguientes etapas. Prefloración. Floración, formación de vainas, llenado de vainas y maduración (Fernández, *et al.*, 1986).

R5 Prefloración. Se inicia cuando aparece el primer botón o el primer racimo. En las variedades con hábito de crecimiento indeterminado el desarrollo de botones florales se notará en el último nudo del tallo o la rama, por el contrario, en las variedades de hábito de crecimiento determinado, al inicio de esta etapa, los racimos se observan en los nudos inferiores.

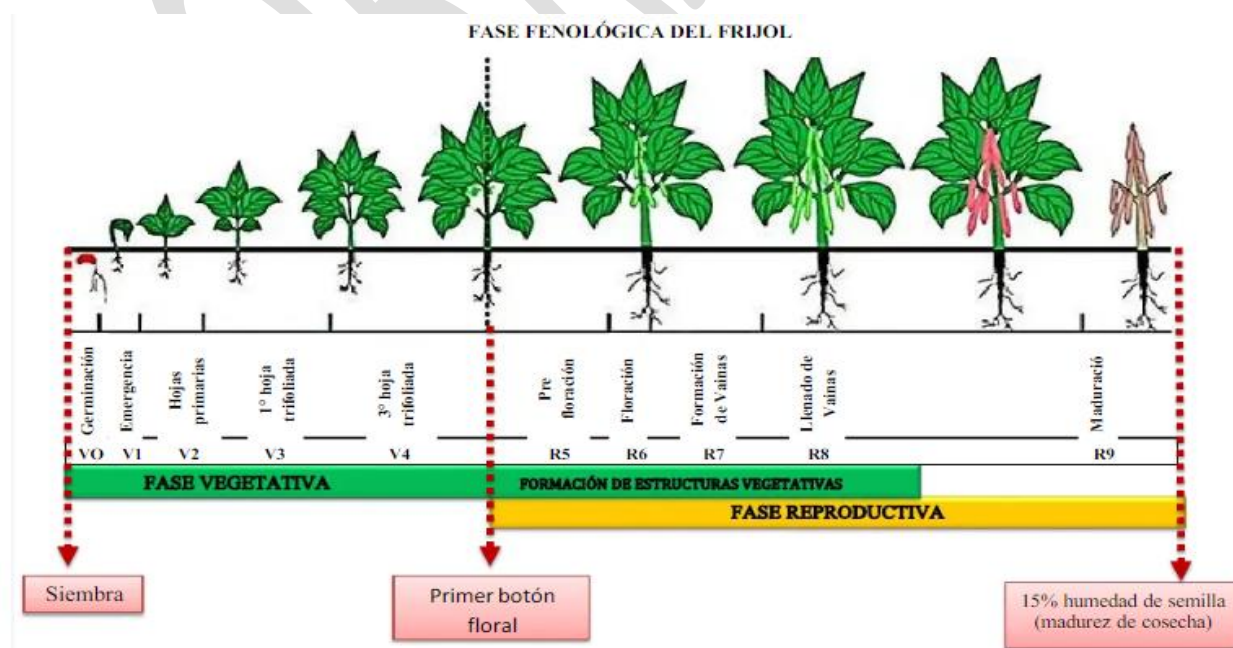
R6. Floración. Cuando la planta presenta la primera flor abierta. Las flores permanecen frescas y turgentes y poseen la coloración característica de la variedad, la cual sucede sólo el mismo día de la antesis. Al día siguiente tornan flácidas y

marchitas y cambian de color. Tres o cuatro días después de la antesis, la corola se marchita y puede estar colgando próxima a desprenderse, dejando visible la vaina joven.

R7. Formación de las vainas. Cuando la planta presenta la primera vaina con la corola de la flor colgada o desprendida. La vaina crece rápidamente, de tal manera, que en alrededor de dos o tres semanas alcanza su máxima longitud y es cuando termina la etapa R7.

R8. Llenado de la vaina. Se inicia cuando la planta empieza a llenar la primera vaina, debido a que comienza un crecimiento acelerado de las semillas, la cual alcanza su máximo peso alrededor de 40 a 45 días después de la antesis. Las semillas tienen un color verde, pero al final de la etapa R8 van adquiriendo el color característico de la variedad, es decir, la testa empieza a pigmentarse. Asimismo, inicia la senescencia de las hojas, perdiendo el color verde, tornándose

R9. Maduración. Se caracteriza por el inicio de decoloración y secado en las primeras vainas, continúa el amarillamiento, la caída de hojas y todas las partes de la planta se secan; las vainas al secarse pierden su pigmentación. El contenido de agua de las semillas baja hasta alcanzar un 15%, momento en el cual las semillas



adquieren su color típico. Termina el ciclo biológico y el cultivo se encuentra entonces listo para la cosecha (Fernández, *et al.*, 1986).

Figura 2. Fenología del frijol (*Phaseolus vulgaris*).

<https://es.scribd.com/document/427573231/fenologia-frijol>

4.6 Variedades y su clasificación

Las variedades del frijol se pueden clasificar de acuerdo a diversos criterios. Por su consumo como grano seco y como grano y vaina verde; desde el punto de vista agronómico se utilizan características como la duración del periodo vegetativo y se habla de variedades precoces o tardías; en cuanto a la reacción al fotoperiodo se dice de variedades sensibles, insensibles o neutras y en lo que respecta a factores limitantes de la producción se ubica a las variedades en al menos las resistentes y susceptibles (Armando, *et al.*, 2011a). Aunque a nivel mundial todas las variedades de frijol quedan incluidas en los criterios anteriormente señalados, a nivel práctico, los países en particular clasifican a sus variedades de frijol de acuerdo a las características de su grano, en especial en lo relativo a su tamaño y color (Figura 3). Dentro de color, se encuentran variedades de frijol clasificadas por su grupo como blanco, crema, amarillo, café marrón, rosado, rojo, morado, negro u otros. El tamaño se determina por el peso de 100 granos y los materiales se clasifican en tres grupos de la siguiente manera: pequeños (hasta 25 g/100 semillas), medianos (entre 25 y 40 g/100 semillas) y grandes (desde 40 g/100 semillas) (Armando, *et al.*, 2011a).



Figura 3. Diversos tamaños y colores del frijol (Armando, *et al.*, 2011b).

La especie de *P. vulgaris* de manera predominante su reproducción sexual es la fusión del gameto femenino y el masculino producida por el mismo individuo (autógama). Es diploide ($2n=2x=22$) teniendo 11 cromosomas muy pequeños que van de 1 a 3 micras con una morfología parecida entre metacéntricos y submetacéntricos. En el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) descifraron en el año 2016 el genoma del frijol identificando 30,491 genes con un tamaño de 635 Mpb.

4.7. Condiciones edáficas y clima

Las temperaturas óptimas para el desarrollo del cultivo oscilan entre 10 a 27 °C, es muy susceptible a condiciones extremas y debe sembrarse en suelos de textura ligera y bien drenada. El pH adecuado actúa entre 6.5 y 7.5, ya que dentro de estos límites la mayoría de los elementos nutritivos del suelo presenta su máxima disponibilidad; no obstante, se comporta bien en terrenos que tienen un pH entre 4.5 y 5.5 (Figura 4).

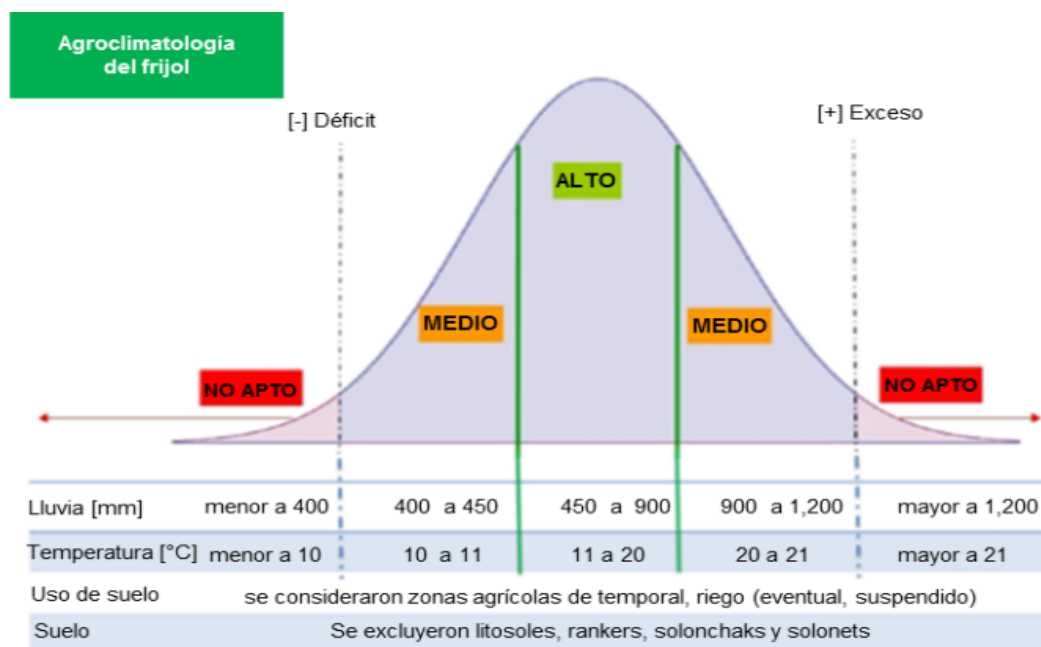


Figura 4. Agroclimatología del frijol. }

4.8. Importancia mundial del frijol

De acuerdo a estudios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el frijol, es la leguminosa alimenticia más importante para el consumo humano en el mundo (CEDRSSA, 2020). Este cultivo es cosechado en sistemas, regiones y ambientes tan diversos como América Latina, África, el Medio Oriente y Europa, siendo un alimento tradicional y básico, específicamente en Brasil, México, América Central y el Caribe. No obstante, su importancia en la dieta de números países, el volumen de producción del frijol respecto a granos como el maíz, el trigo y el arroz representa en promedio sólo el 1.0% (CEDRSSA, 2020).

En cuanto a México se refiere se convirtió junto con el maíz la base alimenticia del país. En América Latina es cultivada durante muchos años por antiguas civilizaciones (Brick y Burgener, 2007), gracias al brinda una muy buena fuente de proteínas, aminoácidos esenciales (lisina, treonina, valina, isoleucina y leucina) hidratos de carbono, minerales y fibra (Ma y Bliss, 1978). Por otro lado, Bennink, (2010) aluden, que existen casos clínicos que avalan que el consumir frijol, trae



beneficios como prevención y tratamiento de enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, obesidad y enfermedades relacionadas con el sistema digestivo, reduciendo niveles de colesterol y glucosa en la sangre.

Sin contar su parte nutricional, tiene la capacidad de fijar nitrógeno en el suelo, formando una asociación de carácter simbiótico con bacterias nitrificantes (predomina *Rhizobium*). El frijol tiene diferentes rasgos conforme crece en los diferentes ambientes en los cuales es cultivado, mostrando variabilidad fenotípica como el hábito de crecimiento, la fenología, el tipo de grano, fotoperiodo. (Becerra y Gepts, 1994). La diversidad fisiológica, la amplia distribución por el planeta y los altos niveles de polimorfismo dificultan el establecer los patrones de domesticación y relación entre genotipos.

Desde el progenitor y los descendientes dan progenie que es fértil y a la vez viable exhibiendo diferencias que pueden contrastar constituyendo el síndrome de domesticación; existe un cambio en los genotipos que son cultivados, exhiben un hábito de crecimiento reducido en comparación con los genotipos silvestres, a la vez hay menos nudos vegetativos, internudos más largos y el tamaño de la hoja es más grande, las semillas tienen un mayor tamaño y tienen una pigmentación menor por antocianina (Koinange *et al.*, 1996). El cultivo de frijol es uno de los cultivos que mejor responde y se adapta a diferentes ambientes, donde la producción internacional de frijol supera los 23 millones de toneladas, de ahí 7 millones se cultivaron en África y Latinoamérica (Pastor y Schwartz, 1994).

Según el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA, 2020). Durante el periodo 2012 – 2018 el crecimiento de la producción mundial de frijol se ha mantenido a una tasa media de crecimiento anual de 3.3%. En 2017, la producción mundial de frijol se ubicó en 32.1 millones de toneladas, siendo el año de mayor producción de esta oleaginosa. Desde 2012 hasta 2017, la producción mundial de frijol se mantuvo a un ritmo de crecimiento que permitió alcanzar las 32.1 millones de tonelada en 2017. En 2018 la contracción en la producción de la India y Brasil provocó una caída de 1.2%, siendo estas dos

naciones las que concentran el 28.8% de la producción mundial en 2018; con el 19.6% y el 9.2%, respectivamente

Respecto a su composición es importante ya que la semilla cuando tiene 11 % de humedad, la semilla tiene 17-30% de proteína, normalmente con bajos en porcentaje de aminoácidos azufrados como metionina y cisteína, pero si tiene un alto porcentaje de lisina. Contiene 57.8% del complejo de azúcares, 4% de fibra, 1.6% de grasa y excelente contenido de ácido fólico, contiene alrededor de 34-89 ppm de hierro y 21-54 ppm de zinc, las hojas son ricas en hierro y vitamina A, menciona Beebe *et al.*, (2000).

En cuanto a calidad nutricional, más de 300 millones de personas la incluyen en su dieta, por consecuencia hace que sea importante a la nutrición (Beebe *et al.*, 2000). El frijol brinda proteínas, fuente primaria de carbohidratos, gran contenido de hierro y otros minerales (Broughton *et al.*, 2003).

4.9. Importancia del cultivo de frijol en México

En la gastronomía y como parte de la cultura de México es fundamental el frijol, pero, aun así, la variedad genética ha ido reduciendo, por ende, reducción de rendimiento y disminución de competitividad del frijol ya que el cultivo se va desplazando a regiones marginales (Bellón *et al.*, 2009). En las poblaciones silvestres del género *Phaseolus* contiene más diversidad de genes, por lo que es un recurso para el fitomejoramiento, por los genes que contribuyen a tolerancia de situaciones adversas como frío, sequía, calor, enfermedades y plagas.

En México, el frijol es de los granos más importante después del maíz por su contenido de proteína, sin embargo, hay una reducción de 3.2 % del cultivo de leguminosas comparando con el incremento de la población con la producción. El frijol es rico en contenido nutrimental de esta manera se mantiene entre los granos más consumidos de México, su contenido de proteínas, hidratos de carbono, niacina, ácido fólico, tiamina, hierro, cobre, zinc, fósforo, potasio, magnesio, calcio y fibra. Las variedades de frijol tienen diferente tamaño, color, forma y crecimiento.



En México se han cultivado 70 variedades de frijol (Sangerman-Joaquín *et al.*, 2010).

El frijol consumido en México descende de genotipos de carácter nativos y genotipos mejorados. Tanto los genotipos criollos como genotipos mejorados, pero en especial de genotipos nativos es de siembra tradicional para autoconsumo. El frijol históricamente es asociado con el progreso de las culturas prehispánicas y en la actualidad juega un papel importante en la población del mundo. El cultivo de frijol en México es una actividad rural para campesinos y consumidores ya que se adapta a diferentes condiciones de clima y tipos de suelo, lo cual hace que alcance una producción de 1.1 millones de toneladas al año según (Acosta, 2021).

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural informa que la producción nacional de frijol en 2021 de manera preliminar alcanza un millón 177 toneladas, aumentando 11.4% con respecto al millón 056 mil 071 toneladas cosechadas en 2020. La SADER, (2022) alude que, en el 2019 México, registró un volumen de 879 mil toneladas de frijol, equivalente a un valor monetario de 13 mil millones 040 mil 180 pesos. En el 2020 hubo un incremento a un millón 056 mil 71 toneladas, lo cual significa 20.1% de lo que se obtuvo en el 2019 con un valor de 16 mil millones 907 mil 101 pesos. En los campos mexicanos se cosecha 4% de la leguminosa que se produce a nivel mundial.

Con respecto a las cifras del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), se trata del segundo cultivo anual con mayor superficie sembrada en México. Al finalizar el año del 2021 México alcanzó una producción de frijol de un millón 198 mil 919 toneladas. Aumentando 7.7% en contraste con un millón 113 mil 396 toneladas de cosecha del año anterior. Los estados con mayor superficie sembrada de frijol son: Zacatecas, Sinaloa, Durango y Nayarit, que producen alrededor del 70 % del volumen de producción que se obtiene en México.

4.10. Importancia del frijol en Campeche

En el 600 a.C. llegaron a Becán, unos grupos de agricultores que empleaban un sistema roza-tumba-quema para poder sembrar la base de su alimentación de maíz, calabaza y frijol. Sin embargo, la producción de la milpa era buena al principio, pero conforme pasaba el tiempo reducía la productividad lo que obligaba a los nativos repetir el proceso desplazándose a otras tierras. La agricultura se complementó con grupos de pesca, caza y recolección de moluscos alude la UNAM (2020).

El frijol uno de los constituyentes de la milpa y siendo Mesoamérica uno de las regiones con más variedad del género *Phaseolus spp.*, reportándose hasta 70 especies, dentro de las especies domesticadas más conocidas está *Phaseolus acutifolius* A., *P. coccineus* L., *P. dumosus* M., *P. lunatus* L., y *P. vulgaris* (Delgado-Salinas, et al., 2006). En la península de Yucatán se reportan dentro de las frijoles cultivado en asociación con la milpa son Jamapa, Xcoolubuul y Tsamá,. Otra especie del género *Phaseolus* reportada es Xpelón o *Vigna unguiculata*, *P. lunatus* o ib, los diferentes variedades de ibes son *Mulición*, *Xmejen ib*, *Xnuk ib*, *Xpechel ib*, *puk' sikal tsutsuy*, *Chac ib*, *Sac ib* entre otros (Martínez-Castillo et al., 2004)

En el estado de Campeche anualmente se siembran alrededor de 1,900 hectáreas de frijol (SIAP, 2016-2020) en condiciones de temporal en el ciclo de primavera-verano. De esta superficie se obtiene un volumen de producción de alrededor de 1,086 toneladas, con un rendimiento promedio por hectárea de 500 kilogramos.

4.11. Tipos de estrés en las plantas

La complejidad y organización con la que está constituido un ser vivo, en este caso las plantas no es la excepción, ya que, a pesar de no poder desplazarse a otros medios como un animal, tiene una relación con el ambiente. La planta está sometida al medio que la rodea, sobre ella existe periodos de estrés, en la que tendrá que ver la intensidad y duración del factor estresante junto con rasgos genéticos que caracterizan a la planta, pero por cada proceso fisiológico que conforman un sistema viviente hay un "límite de estabilidad" que una vez sobrepasado este punto por un factor biológico o abiótico genera estrés en el individuo (Zlatev, et al., 2003)

4.11.1. Estrés ambiental

Benavides (2002) manifiesta que el estrés es una desviación significativa de las condiciones que mejor le convenga al individuo a lo largo de su vida. En refutación a la desviación se hacen cambios en todos los niveles de la planta, cambios reversibles o no. Sin embargo, conforme el periodo de estrés se va extendiendo se ve reflejada en la planta menor vigor, pero a la vez la planta genera ajustes en toda su estructura para adaptarse a la situación hasta que el estrés sobrepase la capacidad de la planta de reponerse de tal evento, provocando daños irreversibles en partes o toda la planta. Entonces el estrés es el conjunto de respuestas de carácter bioquímico y fisiológico que definen un estado particular del organismo diferente al observado bajo un rango de condiciones ideales. La resistencia al estrés es la capacidad de un individuo de activar respuestas ante estímulos ambientales que repercuten negativamente o permanecen en estado de estrés sin que su fenotipo sea modificado significativamente.

Los factores ambientales que originan estrés en las plantas son el déficit hídrico, temperaturas extremas, radiación, salinidad, déficit de nutrientes, toxicidad, alcalinidad o ácidos, incluso el viento. Causando efectos de interrupción de la homeostasis osmótica e iónica, daña las proteínas funcionales y estructurales y membranas al igual que los procesos fisiológicos. Hay relaciones múltiples y complejas entre el ambiente y el grado de organización de los seres vivos. El medio ambiente influye en la planta que será determinada por la intensidad y duración del factor de estrés en interacción con los genes característicos de la planta (sensu Zlatev *et al.*, 2003)

Las plantas al no tener movilidad son sésiles, están sujetas a cambios ambientales que modifican o ajustan el desarrollo y metabolismo para hacer frente a los cambios. La respuesta a los estímulos requiere un mecanismo donde las señales internas y externas son manifestadas ocasionando una reacción de la planta (Stepanova y Alonso, 2005).

Una planta crecida en campo tiende a experimentar las diferentes condiciones abióticas estresantes que se presentan en la etapa de crecimiento, puede ser la disminución de la disponibilidad de agua temperaturas extremas, disminución de disponibilidad de nutrientes esenciales, exceso de luz, suelos duros que restringen crecimiento de raíces (Verslues *et al.*, 2006).

4.11.2. Estrés fisiológico

Gracias a los investigadores y autores como Hsiao (1993), Turner y Kramer (1980), Aspinall y Paleg (1981), Hanson y Hitz (1982), Blum (2005) se resumen las características estudiadas para tener una visión clara de las respuestas al estrés hídrico. Muchas respuestas tienen que ver con el estrés hídrico, desde metabólicas, fisiológicas hasta morfológicas; pueden ser repuestas que se presentan en un momento específico (transitorias) o bien involucrar cambios en la expresión génica sujetas a episodios de déficit hídrico (Bray, 2002).

Flexas (2002) dice que las respuestas inmediatas son modificaciones que ocurren en un plazo de tiempo corto (desde minutos hasta días), el cual es contrarrestada por una regulación estomática con el fin de reducir la pérdida de agua por transpiración. La aclimatación se refiere a respuestas de estrés que ocurren en periodos más largos (de semana a años), incluyendo al ajuste de potencial osmótico por la acumulación de solutos, cambios en la elasticidad en las paredes celulares y cambios morfológicos. También las adaptaciones a periodos largos de sequía incluyen la fijación de patrones de genes de distribución de biomasa, modificaciones anatómicas específicas, mecanismos fisiológicos, con una disminución general del crecimiento para el equilibrio de los recursos adquiridos (Chapin, *et al.*, 1990).

Ocurre una reducción del potencial hídrico de los tejidos a causa de la sequía, ante esta situación las plantas responden sintetizando una cantidad muy grande de compuestos llamados osmoprotectores, que se comporta como osmolitos, haciendo más fácil la retención de agua por el citoplasma como compuestos guardianes que aseguran la estructura de las membranas y de las macromoléculas. En el

funcionamiento celular tienen solutos compatibles llamadas osmoprotectores, nombrando los compuestos con átomos de nitrógeno en su molécula, siendo prolina y los compuestos de hidroxilo, como los polialcoholes y los azúcares, señala (Tadeo, 2000).

Por otro lado, Alarcón (2000) menciona, que observó una resistencia al estrés hídrico en las plantas cuando se le suministra aminoácidos que implican respuestas fisiológicas al igual que estructurales y modificaciones morfológicas en corto tiempo y a largo plazo, ayudando a reducir el estrés en las plantas y a su vez maximizando recursos internos y externos.

Las plantas desarrollan distintos mecanismos de defensa ante el estrés causado por falta de agua, desde la profundidad, ramificación de las raíces, grosor y posición de las hojas, cantidad y movimiento de los estomas, grosor de la cutícula, contenido de cera, superficie foliar. En relación con Sánchez y Arquirreolea (2000) las plantas que se adaptan a estas condiciones desfavorables modifican su fisiología, morfología, haciendo un conjunto de mecanismos, señales que mejoran la resistencia de las plantas, permitiendo cumplir con éxito su ciclo de vida, pueden ser llamados mecanismos de escape, mecanismos evitación y mecanismos de tolerancia.

En el mecanismo de escape: las plantas se concuerdan su fenología para consumir su ciclo evitando los periodos de sequía. Mostrando un alto grado de plasticidad, completando su ciclo antes que los cambios fisiológicos causados por el estrés se hagan presentes, así como en las fechas de floración y fructificación temprana (Araus *et al*, 2002).

El mecanismo de evitación tiene que ver como retrasar lo más que se pueda la deshidratación, se incrementa al máximo la capacidad de agua o reducir al mínimo sus pérdidas, un ejemplo sería las plantas ahorradoras de agua y las gastadoras de agua. Las que ahorran agua usan la estrategia de cierre de estomas reduciendo la pérdida, haciendo una reducción en la transportación cuticular, reducción de la superficie transpiratoria, hay un incremento de la resistencia hidráulica de las raíces

(acumulación). Por otro lado, las plantas derrochadoras de agua en su estrategia incrementan la absorción de agua para poder mantener en orden las tasas de crecimiento, fotosíntesis, contenido de agua en los tejidos por medio del contenido relativo de agua en los tejidos aumentando la superficie radicular y reduciendo la resistencia del agua (Nobel, 1991).

En el mecanismo de tolerancia hace referencia a cierta capacidad de resistir en forma reversible la deshidratación de los tejidos menciona Martínez *et al.* (2002). Estos ajustes que realizan las plantas son ajustes bioquímicos para mejorar las posibilidades de vivir bajo condiciones de potencial hídrico bajo.

Rao *et al.* (2001) dice que la tolerancia a la sequía se hace presente cuando se involucra el mantenimiento de presión de turgor positiva a bajo potencial hídrico en los tejidos. Por lo que se interpreta como plantas tolerantes a potenciales hídricos bajos. Separando sus mecanismos en dos tipos, el primer grupo se enfoca al mantenimiento de la turgencia celular (ajuste osmótico y ajuste elástico); el segundo grupo permite la tolerancia de la deshidratación (tolerancia protoplasmática). En el ajuste osmótico: en la acumulación de osmolitos en la célula, manifiesta una disminución del potencial osmótico, permitiendo absorción de agua y presión de la turgencia, en condiciones de estrés hídrico contribuye al mantenimiento de procesos fisiológicos como la apertura estomática, fotosíntesis y expansión celular (Morgan, 1992). En tanto el ajuste elástico: gracias a las propiedades plásticas y elásticas que presentan las paredes vegetales, son las que generan el potencial de turgencia en las células vivas, la plasticidad hace posible la extensión permanente de las células en crecimiento así se refiere (De Herralde, 2000). Por otro lado, al minimizarse la elasticidad permite una capacidad mayor de extracción de agua del suelo en condiciones de sequía. Se menciona que la tolerancia protoplasmática; permite mantener las células vivas a CRA muy bajos, este mecanismo resulta de gran importancia para lograr una mayor eficiencia en zonas desérticas.

4.11.3. Estrés bioquímico

Benavides (2002) comunica que la alteración en el metabolismo ocurre en respuesta a los factores ambientales negativos como temperatura, sequía y salinidad, etc., entonces los mecanismos bioquímicos y moleculares es la vía en que las plantas sobrellevan el estrés abiótico y biótico. La respuesta bioquímica ante la deshidratación es la acumulación de metabolitos nitrogenados.

El déficit hídrico induce a que los genes generen productos, distinguiéndose dos grupos: proteínas que se desempeñan aumentando la tolerancia a condiciones de estrés abiótico y las proteínas regulatorias (genes con única función y genes regulatorios). Dentro del primer grupo se encuentran moléculas como chaperonas, *late embryogenesis abundant proteins* (proteínas LEA), osmotinas, proteínas anticongelantes, proteínas de unión a ARNm, enzimas claves para la biosíntesis de osmolitos, proteínas de canales hídricos, transportadores de azúcares, enzimas de detoxificación y proteasas (Sihnozaki y Yamahuchhhi-Shionzaki, 2007). El segundo grupo incluyen diversos factores de transcripción, proteínas quinasas y fosfatasas, enzimas del metabolismo de lípidos, entre otros según (Nakashima *et al.*, 2014).

El ajuste osmótico se define como la disminución del potencial osmótico debido a la acumulación neta de solutos, en otras palabras, un mecanismo que permite a las plantas responder a estrés por agua (Chen y Jiang, 2009). Por otro lado, la osmorregulación, se explica como la regulación del potencial osmótico dentro de la célula por la adición o separación de solutos de la solución hasta que el potencial osmótico dentro de la célula (intracelular) es similar al potencial osmótico del medio que la rodea la célula según Zhang *et al.* (2004).

Los osmolitos se sintetizan y se acumulan para evitar la deshidratación, acumulándose sin interrumpir las funciones celulares; actuando como agentes osmóticos balanceantes, para después ser degradadas una vez consumado el evento estresante Según Valliyodan y Nguyen, 2006. Se pueden acumular solutos compatibles como aminoácidos como prolinas; alcoholes azucarados por ejemplo pinitol y azúcares como glicina betaína, entre otros, acumulándose permitiendo el

ajuste osmótico, disminuyendo el potencial osmótico, con lo cual se mantiene la turgencia en la célula (Valliyodan y Nguyen, 2006).

La prolina se ha reportado su acumulación frente a otros eventos de estrés, como salinidad, bajas temperaturas, exposición a metales pesados, radiación UV, entre otros (Liang *et al.*, 2013). Szabados y Savouré, 2010 mencionan estos aminoácidos rígidos conformacionales y esenciales en el metabolismo primario. Cuando se acumulan en el citoplasma de la célula disminuye el potencial osmótico balanceando la disminución del potencial hídrico en el suelo ajustándose (ajuste osmótico), manteniendo el turgor y contenido de agua dentro de sí misma, protegiendo las estructuras celulares y macromoléculas cuando ocurre la deshidratación. Explicado de otra manera cuando el contenido de agua en la célula disminuye pueden remplazar este fluido actuando como sustituto, de esta manera estabiliza la estructura de la célula a través de interacciones hidrofílicas y puentes de hidrógeno, menciona Verslues y Sharma, 2010.

Las proteínas conocidas como *late embryogenesis abundant* (LEA) se acumulan en grandes cantidades en el último estado de la maduración de la semilla. Cuando ocurre la adquisición de tolerancia a deshidratación por parte del embrión al igual durante un estrés por agua en órganos vegetativos, poseen un rol de protección cuando hay limitaciones hídricas (Pedrosa *et al.*, 2015).

Duan y Cai (2012) Iniciaron un experimento en plantas transgénicas en el que se observó que la sobreexpresión de genes que codifican para proteínas LEA, dando resultado en un aumento de la tolerancia a estrés abiótico, donde su propuesta menciona que existe una correlación de manera positiva entre la provisión de proteínas LEA y la tolerancia de las plantas a estrés abiótico.

La acumulación del aminoácido prolina, tiene diversas funciones, se le atribuyen actuar como compuesto de carbono y nitrógeno, sirve como desintoxicante del amonio durante el déficit hídrico, protege contra radicales hidroxilos, también es fuente de energía para recuperación y estabilizador de las proteínas a valores bajos

de potenciales hídricos. Así ayuda a la supervivencia de las funciones celulares (Sánchez *et al.*, 2007).

Smeekens, (1998) demostró que los azúcares son señales que cambian la manifestación de genes relacionados con el crecimiento y estrés. Las plantas sometidas a un estrés hídrico cambiaron el contenido de sus carbohidatos solubles, así como en la actividad de las enzimas participantes en el metabolismo del carbono. En un evento de ligero estrés, hay una reducción fotosintética debido a una disminución de la capacidad de reposición de la Rubisco, pero no la eficiencia de la carboxilación, que establece la actividad de esta enzima. En caso de estrés moderado a severo se minimiza la eficiencia de la carboxilación. Hay un aumento de la resistencia del mesófilo a la difusión del CO_2 así disminuye la concentración real de CO_2 en el cloroplasto. Esta reducción de la eficiencia de la carboxilación se debe a los aumentos de la resistencia del mesófilo y no a la inhibición de la actividad de la enzima Rubisco (Medrano y Flezas, 2002).

4.11.4. Estrés hídrico

4.11.4.1. Potencial hídrico

La capacidad de la planta para hacer frente a situaciones desfavorables se le conoce como tolerancia al estrés. Cuando la planta es expuesta a exposiciones previas al estrés, se aclimata. Y la adaptación alude a la resistencia que presenta en determinado estrés, ya que las características genéticas que ha adquirido en un proceso largo de selección tras muchas generaciones (Carrasco, 2007).

Sin el transporte de agua en las plantas no sería posible la existencia de vida, ya que utiliza la mayor parte para procesos físicos como medios de reacción, disolvente y en el nivel estructural brindando turgencia almacenándose en las vacuolas. Solo el 1% del agua que adquiere la utiliza como nutriente. La capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema se refiere como potencial hídrico (Ψ) basándose en los gradientes que generan en la xilema a causa de la transpiración del vapor de agua que sale por las hojas. Debido que la transpiración genera un



aumento en el gradiente de potencial hídrico en la planta, consiguiendo que el agua ascienda por medio de las raíces (mayor Ψ) a las hojas (menor Ψ) a través de xilema, por características de adhesión y tensión de las moléculas de agua.

De acuerdo a la composición del suelo estará relacionado la capacidad de retener agua y por ende el potencial hídrico matriarcal (Ψ_m). En la absorción de agua que se encuentra en el suelo, reduce el potencial hídrico desplazándose el agua de las zonas más húmedas a las más secas. Dependiendo del tipo de suelo y el contenido hídrico será velocidad con la que el agua pasa el suelo a las raíces. Ejemplificando, en un suelo arcilloso que está constituido por partículas más finas que un suelo arenoso, por lo que el suelo arcilloso retiene más contenido de agua, por lo tanto, el potencial hídrico matriarcal es mayor (más negativo). Con la misma cantidad de agua el potencial hídrico del suelo arcilloso es menor en comparación del arenoso. El agua se mueve en la planta por medio de dos tipos de transporte pasivo, intentando mantener el equilibrio hídrico: El flujo masivo; traslación de agua y solutos en una sola dirección, siguiendo las diferencias de presión creadas por la evapotranspiración. Debido a las fuerzas de adhesión y cohesión que establecen las moléculas de agua por medio de los enlaces de hidrógeno. La difusión; que es el transporte de agua a corta distancia, del suelo a la raíz.

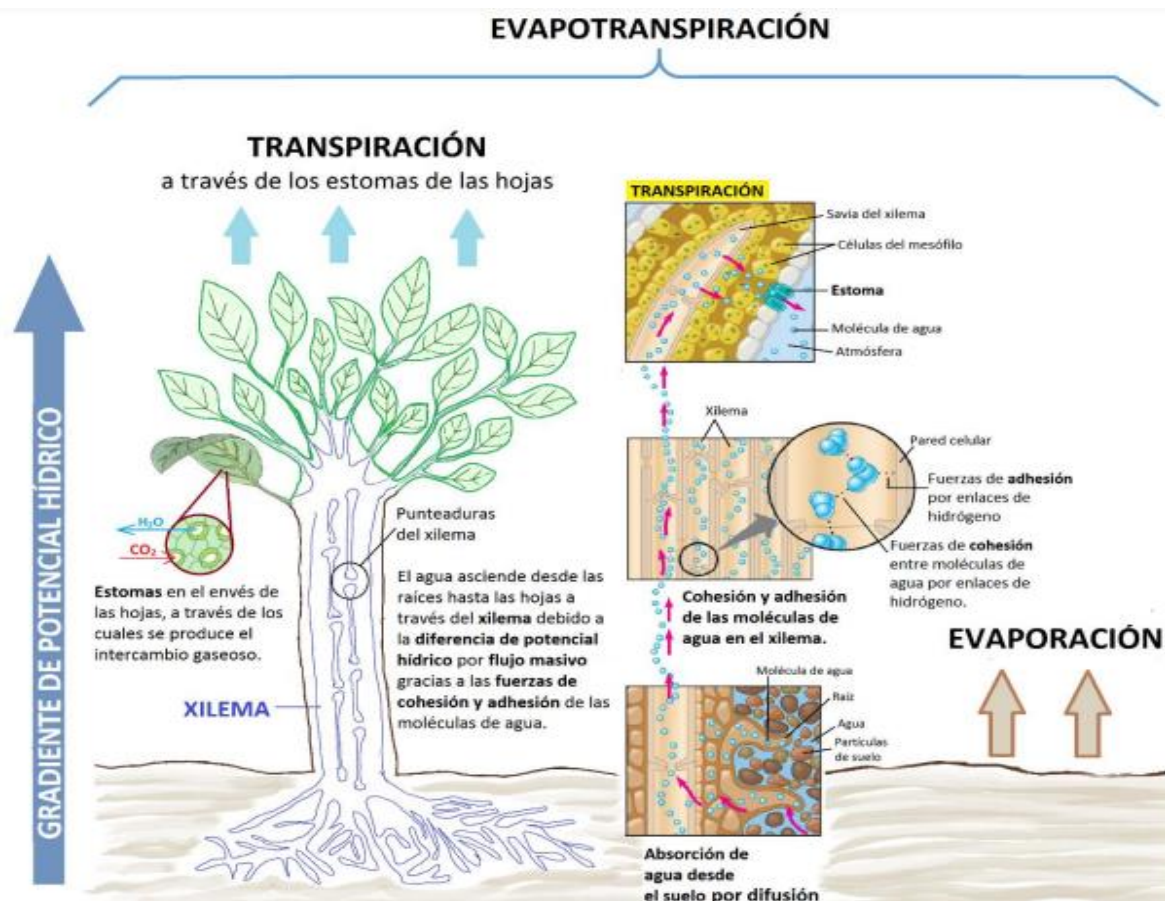


Figura 5. Transporte de agua en la planta. A la izquierda se representa una simplificación de la estructura del xilema, a través del cual el agua asciende desde las raíces hasta las hojas siguiendo un gradiente de potencial hídrico. En este proceso intervendrá tanto el transporte por flujo masivo, que permitirá el ascenso del agua a través del xilema, como la difusión, presente en el transporte de agua entre células y en la absorción de agua por las raíces. A la derecha se representa en detalle el proceso de transporte por flujo masivo, en el que es fundamental las fuerzas de adhesión y cohesión que establecen las moléculas de agua con la pared del xilema y entre ellas respectivamente, gracias a la capacidad de formar enlaces de hidrógeno. Con la apertura estomática tendrá lugar el intercambio gaseoso, liberándose vapor de agua hacia la atmósfera, proceso conocido como transpiración (Carrasco, 2007).

Un déficit hídrico prolongado provoca cavitación y alteración de procesos metabólicos.

En cuanto a la cavitación, se rompen fuerzas de cohesión del fluido xilemático, provocando la formación de burbujas en el interior extendiéndose hasta producir

una embolia, evitando el transporte de agua en el xilema. Aunque el xilema reduce este efecto ya que posee unas punteaduras por medio de ellos puede moverse el agua evitando el conducto bloqueado. Hay tres factores por lo que se genera una cavitación: patógenos (hongos), congelación (en el descongelamiento de producen burbujas de aire) y el déficit hídrico. Siendo este último la causa primordial, debido al incremento de la transpiración incrementa la tensión en el vaso, formándose pequeñas burbujas de aire produciendo la cavitación (Carrasco, 2007).

Debido a las a las variaciones del clima, crea un estrés a la planta que a pesar de estar inmóvil logran desarrollar respuestas antes las adversidades, el limitante principal en cualquier ecosistema es la obtención de agua, además, si la tasa de transpiración excede a la toma de agua provoca estrés en las pocas o muchas plantas que ahí crecen.

4.12. Las plantas se clasifican según el grado de deshidratación que soportan:

a) Poiquilo-hídricas: Aquellas cuyos protoplasmas son capaces de soportar deshidrataciones y rehidrataciones sin sufrir daño, bien porque no se vean afectadas o porque sean capaces de recuperarse fácilmente. En este grupo encontramos líquenes, musgos, algas, helechos y algunas plantas vasculares (Azcón-Bieto, y Talón, 2008).

b) Homeo-hídricas: Lo son la mayoría de las especies de plantas vasculares. No son capaces de soportar potenciales hídricos muy bajos causando en ellas daños irreversibles. Que estas plantas toleren o no la desecación depende, entre otros factores, de la acción del ácido abscísico y de la síntesis o no de “proteínas de deshidratación” (Azcón-Bieto, y Talón, 2008) o dehidrinas. Las dehidrinas son unas proteínas que se expresan en condiciones de déficit hídrico y se encuentran unidas a lípidos de membrana. Pueden estabilizar membranas, proporcionar residuos hidroxilados para unirse a proteínas en lugar del agua y regular el potencial osmótico

al actuar como atrapadoras de agua en situaciones de alta osmolaridad (Rangel, 2009).

De acuerdo al ambiente donde viven las plantas, generan una evolución diferente. Catalogándose de acuerdo a su requerimiento de agua pueden ser consideradas como hidrófitas (adaptadas a vivir total o parcialmente en agua), mesófitas (están adaptadas a un aporte moderado de agua) y xerófitas (adaptadas a ambientes áridos).

Las plantas tienen sus propios factores para un mejor uso del agua por medio de la evolución, un ejemplo: es la resistencia cuticular, una capa cerosa sobre la superficie de la hoja enriquecida de materiales hidrófobos dificultando la pérdida de agua. Las plantas xerófitas tienen mayor resistencia cuticular que las mesófitas e hidrófitas; la regulación osmótica; reducción de área foliar, abscisión foliar, disminución de la transpiración, almacenamiento de agua.

Las plantas también poseen mecanismos de aclimatación que se activan en respuesta a estrés hídrico (Nilsen y Orcutt, 1996). Cuando el déficit hídrico se desarrolla lentamente, se dan cambios en procesos de desarrollo que tienen varios efectos sobre el crecimiento. Uno de principal importancia es la limitación específica de la expansión foliar. Aunque el área foliar es importante, pues de ella depende la fotosíntesis, una rápida expansión foliar puede afectar negativamente la adaptación a la poca disponibilidad de agua. Otro proceso que se modifica es el crecimiento radicular. La disponibilidad de agua afecta la relación entre el crecimiento de la parte aérea y la raíz; la raíz continúa su desarrollo mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés. Así, las plantas son capaces de continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo (Shao *et al.*, 2008).

Otro mecanismo de resistencia a nivel fisiológico es el cierre de estomas, ya que estos son los responsables de la mayor proporción de pérdida de agua en las plantas (Taiz y Zeiger, 2006). A nivel celular, otra respuesta de resistencia es el ajuste osmótico, que consiste en una disminución del potencial hídrico en los tejidos

vegetales, lo cual tiene como consecuencia la entrada de agua y, por tanto, no se presenta una disminución en el turgor o en la productividad fotosintética.

Una respuesta molecular de las plantas al estrés, y quizá una de las más importantes, es la modificación de la expresión de genes. Durante el déficit hídrico, diferentes tipos celulares responden incrementando o disminuyendo la expresión de algunos genes. Igualmente, se ha visto que muchos genes que no se expresan en condiciones de irrigación óptima pueden empezar a hacerlo bajo déficit hídrico.

4.13. Efecto de estrés hídrico en las plantas

Una planta crecida en campo tiende a experimentar las diferentes condiciones abióticas estresantes que se presentan en la etapa de crecimiento, puede ser la disminución de la disponibilidad de agua temperaturas extremas, disminución de disponibilidad de nutrientes esenciales, exceso de luz, suelos duros que restringen crecimiento de raíces (Verslues *et al.*, 2006).

La sequía puede definirse como la condición causada por escasez o ausencia de agua. Se puede decir que la disponibilidad hídrica es restringida para las plantas, por consiguiente, puede interferir con los distintos procesos celulares que ocurren dentro del organismo (Zargar *et al.*, 2017). Las plantas pueden responder y adaptarse ante la escasez hídrica para poder sobrevivir bajo condiciones extremas. La respuesta puede iniciarse cuando registran el estímulo, el cual activa vías de transducción de señales para transmitir la información dentro de las células, donde ocurrirán cambios en la expresión genética, los cuales serán integrados dentro de la respuesta adaptativa para modificar el crecimiento y desarrollo (Wang y Bughrara, 2007). Estas capacidades que las plantas tienen para responder y sobrevivir al déficit hídrico celular dependerán de todos los mecanismos que ella puede integrar. Además, la respuesta dependerá de la especie y genotipo, la duración y severidad del estrés, la edad y estado de desarrollo de la planta, entre otros factores (Zargar *et al.*, 2017).

Los síntomas que manifiestan las plantas con estrés agua son: una veloz inhibición del crecimiento de las hojas, crecimiento solo de raíces, y en pequeño grado crecimiento del tallo, continuado por el cierre completo o parcial de las células oclusivas (estomas) (Zargar *et al.*, 2017).

Si la sequía no es mitigada, puede conducir a una complicación en el desarrollo reproductivo, senescencia foliar prematura, marchitamiento, y muerte (Neumann, 2008). Mientras que, en el nivel celular, el déficit hídrico provoca pérdida de turgor, alteración en los gradientes de potencial hídrico, cambios de fluidez, composición y alteración de membrana, desnaturalización de proteínas (Valliyodan y Nguyen, 2006).

El cierre de estomas sirve para reducir la pérdida de agua, ocurre en respuesta de una disminución en el turgor de las hojas y/o el potencial hídrico, incluso baja humedad en el aire, no obstante, la respuesta osmótica está más relacionada al contenido de humedad del suelo que al estatus hídrico foliar. (Brestic y Zivcak, 2013). Pero lo que induce al cierre de estomático es el Ácido Absísico (ABA), además el crecimiento de la planta puede ser detenido y la senescencia foliar acelera (Sginozaki *et al.*, 2017).

El cierre estomático no es la única vía que tiene la planta ante el estrés hídrico, no todas las plantas, más si la mayoría tienden a manifestar un incremento en el uso eficiente del agua cuando el déficit de agua está dentro de los límites de tolerancia. El aumento del uso de la eficiencia del agua tiene una correspondencia entre la asimilación de carbono y la conductancia estomática, en otras palabras, la pérdida de agua comienza a ser restringida antes que la inhibición de la fotosíntesis; las plantas han ido perfeccionando la absorción de carbono contra la pérdida de agua (Lawson y Blatt, 2014). En el proceso de deshidratación ocurren las variaciones del metabolismo. Hablando de especies que toleran la sequía, tienen mecanismos de control de función de los estomas, permitiendo la fijación de carbono, aun en condiciones estresantes, aumentando la eficiencia en el uso del agua al Igual los

estomas se abren con mayor rapidez cuando el estrés concluye (Brestic y Zivcak, 2013).

Lawson y Blatt, (2014) mencionan que la productividad y la evapotranspiración tienen una correlación; donde refleja que la transpiración muestra un compromiso con la fotosíntesis, debido que la difusión de agua hacia la atmósfera y el dióxido de carbono hacia la hoja es regulada por los estomas. El parámetro usado para descubrir el compromiso entre la transpiración y la fotosíntesis es la Eficiencia del Uso del Agua (EUA), que en definición es la proporción molar del carbono asimilado en la fotosíntesis (A) y el agua perdida por Transpiración (E) (Nobel, 2005). La EUA está en relación con los aumentos de estrés hídrico (potencial hídrico más negativo) según Squeo y Ehleringer, (2004). La EUA se puede estimar como la tasa de acumulación de materia seca a través del tiempo con respecto al agua transpirada (eficiencia de transpiración, o como la tasa de asimilación de dióxido de carbono en relación a la conductancia estomática o transpiración (EUA de intercambio gaseoso o instantáneo) (Moghaddam *et al.*, 2013).

Habitualmente el déficit hídrico se da en situaciones que conllevan a un exceso de luz. El estrés hidroedáfico ocurre al mismo tiempo incrementando en la temperatura ambiental y la radiación de luz durando el verano según Chaves *et al.* (2003) Mediante cambios estructurales las plantas se aclimatan, haciendo cambios sofisticados como en la estructura y distribución de los cloroplastos a nivel de célula y/o decremento de tamaño del complejo captador de luz del aparato fotosintético, puede indicar cambios en relación con la clorofila a/b (Kurasová *et al.*, 2002)

Las respuestas llevadas a cabo en eventos de estrés por parte de la planta son varias, primeramente, la pérdida parcial en el volumen celular relacionado con la pérdida de agua, así se minimiza la turgencia de las células (Lawlor, 2002).

Esta presión de turgencia es necesario para la expansión celular y a su vez al crecimiento general de la planta, sin esta presión de turgencia conlleva a una reducción del mismo en condiciones de estrés hídrico. De manera paralela las encargadas de la apertura y cierre estomática es el ácido abscísico (ABA) que se

manifiesta por la pérdida de volumen de las células oclusivas. La necesidad de agua en la planta repercute en los procesos fisiológicos y metabólicos, porque es el medio de transporte y distribución de los metabolitos, en él se producen reacciones bioquímicas, es disolvente de azúcares y sales. Haciendo que su ausencia provoque más dificultad en los procesos metabólicos (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

Aranjuelo (2011) menciona que diversos procesos se ven afectados por el estrés hídrico, uno de estos es la fotosíntesis, ya que al cerrarse los estomas evita la pérdida de agua, pero, se reduce la incorporación del CO_2 , repercute sobre el transporte de electrones y metabolismo fotosintético (contemplando la actividad de Rubisco hasta alteraciones en la biosíntesis de almidones o sacarosa) sin embargo, muestra una compleja aclimatación del aparato fotosintético al estrés.

4.14. Control genético

El estrés hídrico en las plantas induce a la transcripción de grupos de genes para combatir dicho inconveniente. Al estar ante un déficit hídrico comienzan la generación y señalización con el fin de dar una respuesta que convenga ante el entorno. En los diferentes tipos de estrés se asocian a la inducción de genes específicos o definidos. Los dos grupos principales, el primero grupo se encargan de la codificación de productos que protegen a las células contra dicho estrés. El segundo grupo se encarga de la regularización de la expresión de los genes y también de la transducción de señales para contrarrestar el estrés abiótico por el que se enfrentan.

Bartels y Salamini (2002) establecieron grupos principales de genes que se expresan ante la respuesta de deshidratación. Hay genes que codifican proteínas con propiedades que las protegen, genes que codifican proteínas de membrana que se involucran en procesos de transporte, genes que hacen a codificación de enzimas que están vinculadas al metabolismo de carbohidratos, genes que se

enfocan en la codificación para moléculas que se dedican a la regulación y genes que se desconoce su función.

Otros autores plantean la existencia de dos grupos genéticos que se expresan en condiciones adversas

Dentro del grupo 1

- Proteínas que como función salvaguardar las macromoléculas y las membranas; Proteínas anticongelantes, chaperonas, proteínas de la embriogénesis tardía, osmotina, y proteínas y de unión a RNAm.
- Los productos que regulan el traslado de moléculas por medio de la membrana, por proteínas de canales de agua y transportadores de membrana.
- La catalización de biosíntesis de varios osmoreguladores por medio de enzimas como; prolina, betaina y algunos azúcares.
- Detoxificación de ROS por medio de enzimas que mantienen normales los procesos del metabolismo, bioquímicos y fisiológicos como: glutatión S-transferasa, epóxido hidrolasa, catalasa, superóxido dismutasa y peroxidasa ascórbica

En el grupo 2 se contempla

- kinasas de regulación de la síntesis de proteínas, kinasas receptoras de membranas, CDP kinasa y Proteínas kinasas como MAP kinasa.
- Elementos de transcripción como bZIP, MYC, MYB y DREB.
- Proteinasas que se abarcan la transducción de señales de estrés e intervención de expresión de genes tolerantes al estrés.

4.15. Efectos del estrés hídrico en el frijol

4.15.1. Factores que generan estrés y disminución del rendimiento en frijol

El cultivo de *P. vulgaris* L. en conjunto con otros cultivos de importancia económicamente hablando, repercuten sobre su crecimiento y desarrollo los factores abióticos: precipitación, temperatura, humedad, viento, luminosidad y mala distribución en cuanto a topografía. las especies se cultivan bajo humedad residual o de temporal predominantemente en México, además de ser afectado negativamente por plagas y enfermedades (Matamoros, *et al.*, 2014).

Matamoros, *et al* (2014) menciona que 60% de la producción mundial de frijol es obtenido en condiciones de carentes de agua, el déficit de agua es el factor que más contribuye en el decremento del rendimiento detrás de las enfermedades. El estrés por falta de agua, es por baja disponibilidad del recurso hídrico en el suelo poniendo en riesgo el crecimiento y desarrollo de la planta y modificando la productividad. De acuerdo a la etapa fenológica de la planta, intensidad y duración del estrés hídrico puede afectar negativamente, causando un daño parcial o mortal en la planta.

Existe una disminución de actividades de los estomas, cerrándose, debido al estrés hídrico, lo cual también se reduce la transpiración de la planta y la fotosíntesis (Pattanagual y Madore, 1999). Hay una reducción de C total, ya que declina la fotosíntesis por el estrés hídrico (Brevadan y Egli, 2003), entonces se genera un daño a la maquinaria biosintética que requiere asimilar el C con el fin de convertirlo en productos metabólicamente útiles (Pattanagual y Madore, 1999). El déficit hídrico induce pérdida de reservas de almidón (Zinselmeier *et al.*, 1999) y azúcares no estructurales que aguantan el crecimiento y desarrollo debido al declive en la acción de la enzima fotosintética galactinol sintasa (Pattanagul y Madore. 1999).

4.15.2. Efecto del estrés hídrico en la etapa vegetativa de frijol

El estrés hídrico es la primordial restricción en la producción de este cultivo, en especial en lugares con baja pluviometría. Cuando la restricción del agua ocurre durante el crecimiento vegetativo puede soportarlo a diferencia de que la restricción hídrica suceda en la etapa reproductiva que tiene adversos efectos sobre el

rendimiento del cultivo (Boicet, 2010). Diferentes autores están de acuerdo que el frijol es susceptible en exceso de humedad y en déficit de humedad durante su desarrollo, al respecto Boicet (2010), menciona que los indicadores de rendimiento, vainas, semillas resultan superiores estadísticamente, cuando la planta de frijol no padece de baja disponibilidad de agua durante su ciclo vegetativo. El Frijol no requiere grandes cantidades de agua cuando esté en su ciclo vegetativo, la exigencia de agua dependerá de su fase de desarrollo, el cultivo demanda agua en la fase de germinación y bastante exigente en la fase de donde se diferencia los brotes florales fructificación y llenado de grano (Alfonso, 1987).

Nielsen y Nelson (1998), dijo al respecto en la etapa vegetativa el estrés hídrico induce al decremento en altura de planta y área foliar del frijol, excepto en su rendimiento. Mientras que estudios revelan pérdidas en el rendimiento del grano debido al déficit hídrico que recae en la etapa reproductiva. Uno de los primeros efectos de la sequía se refleja en hojas con menor tamaño, en menor captación de la luz y lo que significa una menor producción de materia seca y grano (Kramer, 1995). Rosas (2003) enseña que el cultivo de *P. vulgaris* requiere de un aumento en el consumo de agua conforme aumenta el desarrollo vegetativo, llegando a requerir aún más agua cuando comienza la fase reproductiva, ya que la demanda de asimilados por las estructuras reproductivas incrementa (Acosta y Kahashi, 1989).

4.15.3. Efecto del estrés hídrico en la etapa reproductiva de frijol

Durante el tiempo de sequía, si la planta está en la fase reproductiva inducirá a un aborto floral, una reducción de componentes del rendimiento, además que reprime a la planta que exprese su potencial reproductivo (Muñoz *et al.*, 2006), provocando por una errática formación de vainas y el llenado de semillas, lo que a la vez repercute en la reducción del número de vainas y rendimiento (Aguilar *et al.*, 2012). Los riesgos y daños que origina la siembra en condiciones de sequía, son elevadas, es preciso disponer de genotipos de frijol resistentes a la sequía, así disminuyendo



los traumas del factor estrés hídrico en los terrenos donde se siembra frijol con humedad residual (Franhm *et al.*, 2003).

El frijol no es tan resistente a la sequía, pero tiene características como la precocidad que confiere escape, evasión y tolerancia a la deshidratación (Acosta *et al.*, 2004). Se conoce que la respuesta de la planta de frijol al estrés hídrico es minimizar el número de días para llegar a la madurez y llenado de granos (Terán y Singh, 2002), la precocidad es una respuesta de los genotipos, Acosta *et al.*, (1999) menciona que las plantas completan su ciclo y escapan de la sequía antes de tener una muy baja disponibilidad de agua, brindando un oportunidad de producción en ambientes con periodos limitados, y alternos de humedad y duración variable de sequía (Osuna *et al.*, 2013).

El frijol es sensible al estrés por déficit de agua y calor cuando se presenta en etapas fenológicas de sensibilidad como el inicio de la floración, inicio en el crecimiento de vainas y llenado del grano, repercutiendo el estrés hídrico de esta manera en el rendimiento y calidad. Miranda y Belmar (1997). Aluden que hay una disminución en grano, número de vainas por grano. Nuñez *et al.* (1998) evaluaron cómo impacta el estrés hídrico en el crecimiento del frijol donde mencionan que declina el porcentaje del área foliar.

Peña y Muñoz (1988) dicen que el estrés de humedad hace que reduzca el área foliar, peso seco, número de granos y el rendimiento del frijol, aunque también las plantas de frijol muestran recuperarse en crecimiento y producción de vaina posteriormente del tratamiento de sequía. Babalola (1980) estudió el estrés por baja disponibilidad de agua en tres variedades y menciona que declina el crecimiento y rendimiento cuando las plantas estaban en la etapa reproductiva. Elston y Bunting (1980) comunican que las leguminosas evitan la sequía entrando en maduración antes de que empeore la deficiencia sustancial en la humedad del suelo, pero no significa que eluden la sequía sin sufrir ninguna consecuencia. Kohashi *et al.* (2002) aluden que los bajos disponibilidad de agua afecta la acumulación de materia seca en los fitómeros, componentes y ramas, así en el área foliar con relación la posición

de la planta y su etapa de desarrollo, afectando así el área foliar y peso seco. Guzmán (2010) evaluó en condiciones controladas el estrés por agua al crecimiento de frijol, y menciona que en condiciones de sequía las raíces crecen más profundas que con riego, además de que el peso seco total de follaje bajo riego presentó mayor peso foliar que con estrés hídrico.

4.16. Intensidad de sequía sobre la producción de frijol en Campeche

El frijol estratégicamente es mucha relevancia en cuanto a desarrollo rural se refiere y social del país, debido que *P. vulgaris* ocupa el segundo lugar entre los granos con mayor volumen a nivel nacional, después del maíz. En Campeche hay una tradición productiva del frijol no solo en tiempos actuales en la gastronomía local, sino desde los sistemas intensivos prehispánicos. Ya que en el estado muestra un buen grado de adaptabilidad y factores climatológicos adecuados. INEGI (2019) menciona que, en el estado de Campeche, el clima que predomina es el cálido subhúmedo, que está presente en el 92 % de su territorio, el 7.75 % muestra un clima cálido húmedo que se localiza en el lado “este” y norte del estado de Campeche, solo un porcentaje muy reducido del 0.05 % presenta clima semiseco. La temperatura promedio de Campeche en el 2021 fue de 33 °C y una mínima de 18°C. Las lluvias son abundantes durante el verano, con una precipitación total anual tiene una variación de 1200 y 2000 mm y en la región norte, en clima semiseco está cerca de 800 mm anuales (INEGI, 2019). En el estado de Campeche en general la vegetación es tropical.

En todo el estado de Campeche se cultiva el frijol, además que puede sembrarse en casi cualquier temporada del año en condiciones de riego la fecha de siembra es del 1 de enero al 15 de febrero, sin embargo, en temporal se siembra del 15 de septiembre al 25 de octubre, incluso es posible sembrar en temporal desde el 15 de agosto menciona el INIFAP (2013). Se debe evitar que la cosecha coincida con la temporada de lluvias, ya que el cultivo exhibe limitaciones en cuanto al rendimiento por déficit o exceso de humedad, más la presencia de enfermedades. En el periodo

de 15 de agosto al 15 de septiembre se refleja un promedio de precipitación de 378.1 mm y 421.5 mm de septiembre a noviembre (CONAGUA, 2021). Las regiones Agroecológicas en el estado de Campeche en el que se cultiva frijol son prácticamente todos los municipios: Calkiní, Campeche, Carmen, Champotón, Hecelchakán, Hopelchén, Palizada, Tenabo, Escárcega, Calakmul, y Candelaria, gracias al régimen de precipitación y la humedad residual.

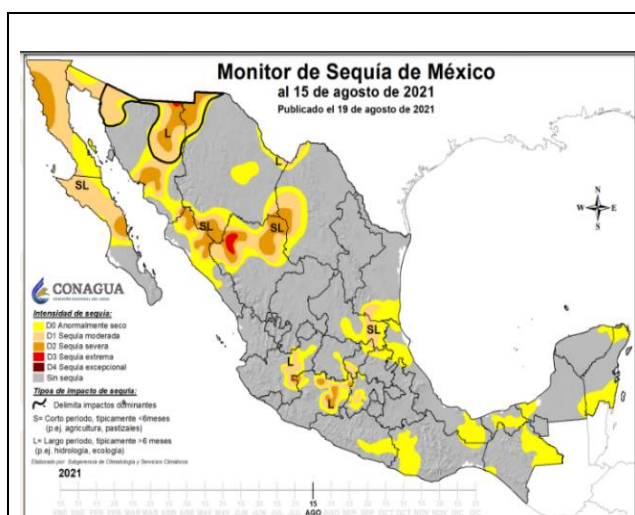


Figura 6. Monitoreo de sequía en México al 15 de Agosto del 2021.

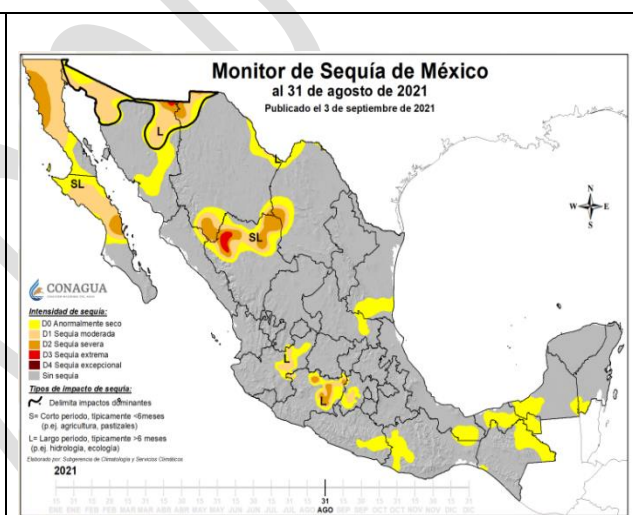


Figura 7. Monitoreo de sequía en México al 31 de Agosto del 2021.

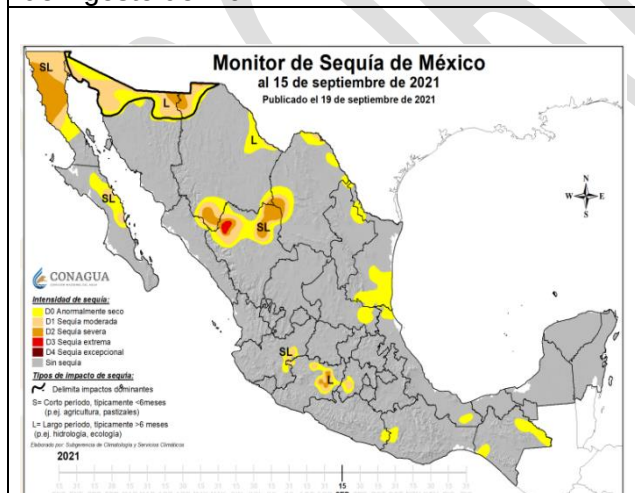


Figura 8. Monitoreo de sequía en México al 15 de septiembre de 2021.

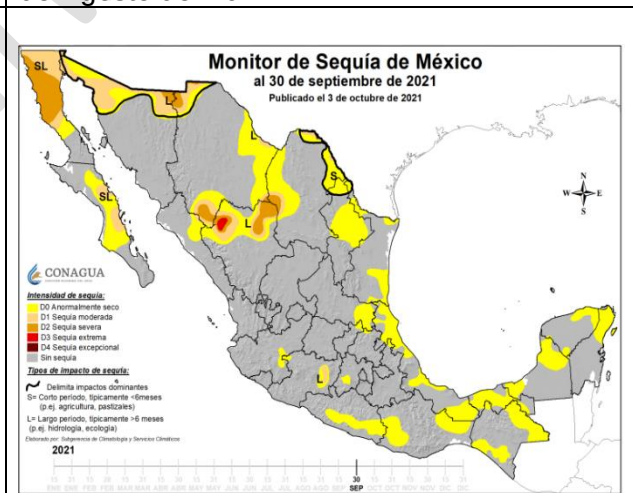


Figura 9. Monitoreo de sequía en México al 30 de septiembre de 2021.

De acuerdo con la CONAGUA (2021-2022) que monitoriza la sequía en México, muestra como está distribuida en el país, dónde Campeche pasa por sequía anormal en partes de sus municipios como palizada, Carmen y Calakmul a partir del 15 de Agosto. El 31 de agosto se extiende la sequía sobre Carmen y reduce en Calakmul. Aunque al monitorizar el 15 de septiembre del 2021 no se encuentra sequía sobre Campeche, el 30 del mismo mes se vuelve a registrar sequía en los municipios de Palizada, Carmen, Calkiní, Hecelchakán, Tenabo, Campeche y Hopelchén.

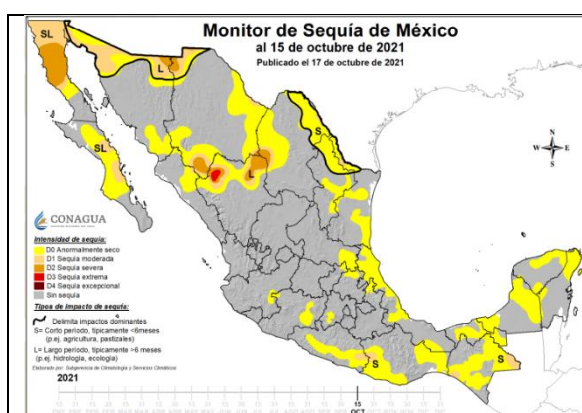


Figura 10. Monitoreo de sequía en México al 15 de Octubre del 2021.

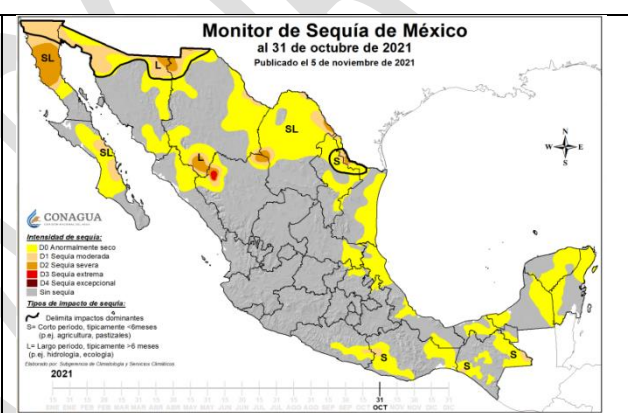


Figura 11. Monitoreo de sequía en México al 31 de Octubre del 2021.

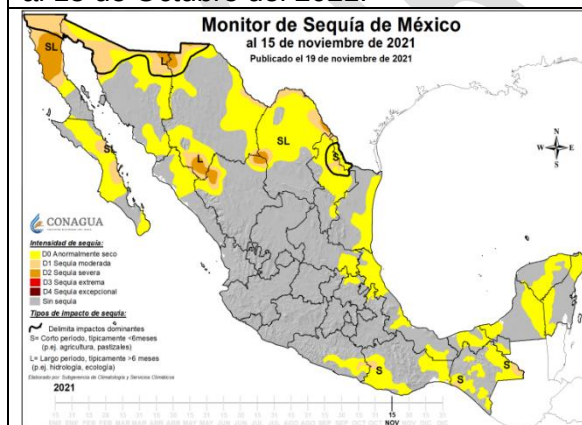


Figura 12. Monitoreo de sequía en México al 15 de Noviembre del 2021.

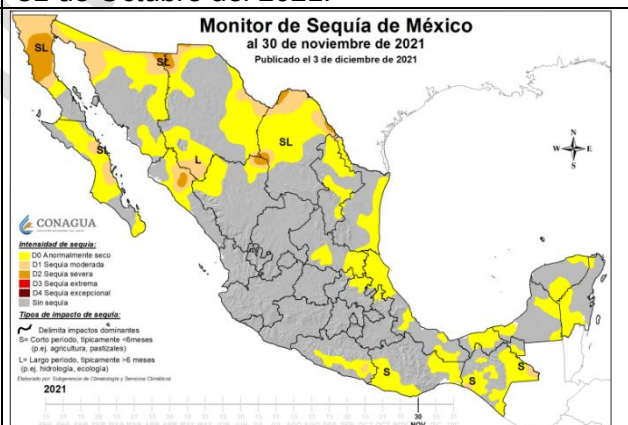


Figura 13. Monitoreo de sequía en México al 30 de Noviembre del 2021.

En el monitoreo de sequía en México realizado por Conagua (2021) muestra que en el Estado de Campeche en el mes de octubre se registraron indicios de sequía en

los municipios Carmen, Palizada, Calkiní, Hecelchakán, Campeche, Hopelchén, y Calakmul. Al finalizar el mes de octubre la sequía cede en la mitad de Calkiní, Hecelchakán y Campeche. Al Inicio del mes de noviembre no existen cambios hasta finalizar el mes, dónde la sequía sobre la superficie de Calkiní, Hopelchén, y Calakmul se reduce a excepción de Tenabo.

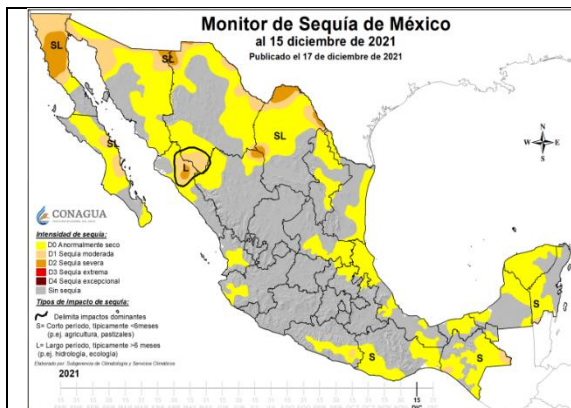


Figura 14. Monitoreo de sequía en México al 15 de Diciembre del 2021.

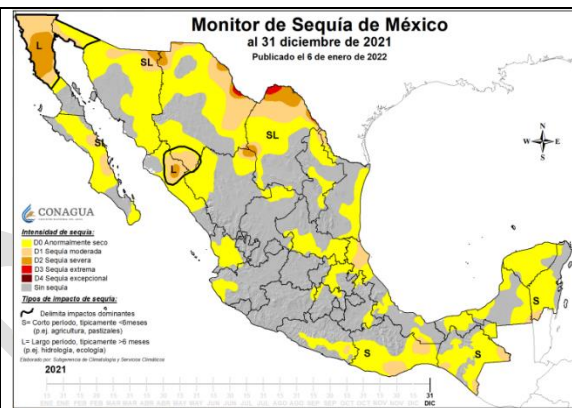


Figura 15. Monitoreo de sequía en México al 31 de Diciembre del 2021.

CONAGUA (2021-2022) realizó el monitoreo sobre la sequía en México en el mes de diciembre, el día 15 de diciembre se registró sobre el estado de Campeche presencia de sequía, específicamente en los municipios de Calkiní. Hopelchén, Tenabo, Palizada y en menor porcentaje sobre Carmen y Calakmul. Aunque al finalizar el mes reduce la presencia de sequía en Calkiní, Hecelchakán, Tenabo, y Palizada, en Calakmul se registró un incremento de sequía sobre su superficie. En enero del 2022 se ve reducido la presencia de sequía en el estado a excepción de Palizada y una parte del Carmen, aunque en el mes de febrero no se registra sequía sobre Campeche.

Un estudio del escenario de cambio climático para el estado de Campeche realizado por SEMARNAT Campeche, SEDUMA Yucatán, SEMA Quintana Roo., (2014) comunican que contemplándolos datos climáticos históricos (1962-2000), realizaron escenarios que abarcan del 2015 al 2039 y en un futuro lejano de 2075-2099. Las previsiones señalan un alza de la temperatura promedio anual, hablando de un

incremento de 2.5°C y 4 °C entre el tiempo actual y el futuro lejano. Campeche al estar en influencia por corrientes marítimas cálidas que provienen del golfo y canal de Yucatán, que tiene una capacidad de almacenar grandes cantidades de calor. Esta zona alcanzó los 32.2°C en el periodo de 1961-2000, y en el escenario de 2015-2039 se alcanza una temperatura de 33.4°C, y aun en un futuro lejano de 2075-2099 llegaría hasta los 35.2°C

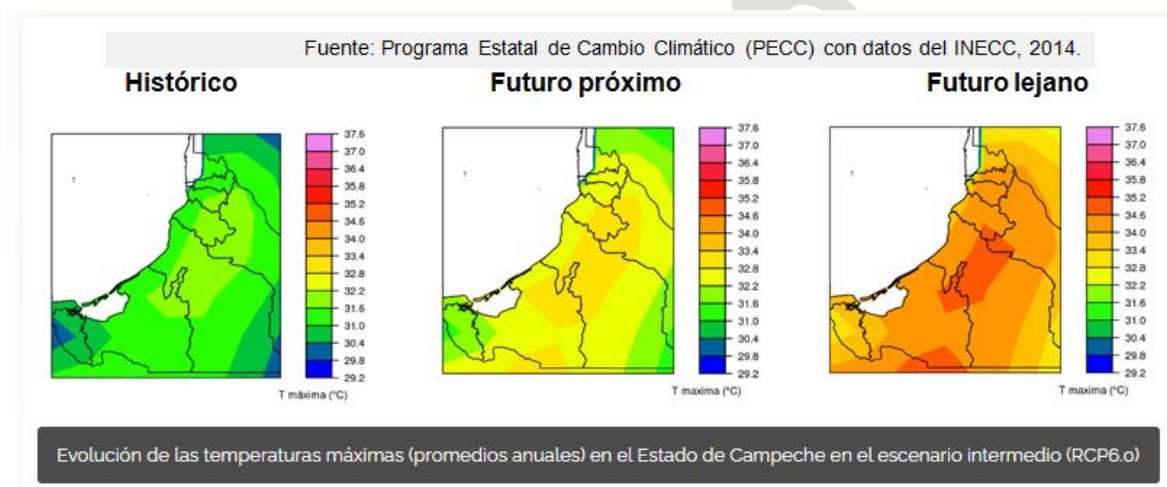
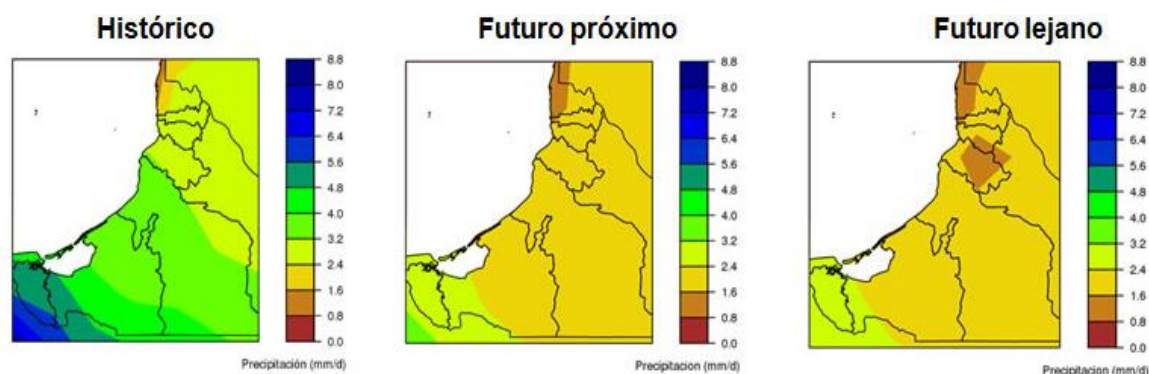


Figura 16. Evaluación de la temperatura en el Estado de Campeche con respecto al Programa Estatal de Cambio Climático (PECC) con respecto futuro.

Las precipitaciones medias anuales, aunque con menor intensidad de igual manera se espera un decremento de acuerdo al análisis de la SEMARNAT., (2014). El gradiente de lluvias es de mayor a menor en dirección al sureste-noroeste de la península de Yucatán pierde intensidad conforme los años pasan, existe una pérdida de 0.65 mm/día o 237.25mm/año entre el periodo histórico de 1961-2000 al futuro lejano de 2075-2099. El verano es la temporada que tiene mayor disminución, ya que pasa de 5.7 y 6 mm/día (2080.5 y 2190 mm/año) entre 1961 y 2000 a 3.4-4.2 mm/día entre 2075 y 2099. El gradiente de lluvia incrementa de norte hacia el sur, siendo el norte con menor pluviosidad y el sur presentará un descenso más acusado en precipitaciones.



Evolución de las precipitaciones (promedios anuales) en el Estado de Campeche en el escenario RCP6.0

Figura 17. Evaluación de precipitaciones en el Estado de Campeche con respecto al Programa Estatal de Cambio Climático (PECC) con respecto futuro.

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 Localización del diseño experimental

La investigación del presente estudio se realizó en el Instituto Tecnológico de Chiná de la localidad de China, Calle 11 S/N entre 22 y 28, Municipio de Campeche, Camp, C.P. 24520 con coordenadas en latitud: 19°46'15" norte y longitud: 90°30'11" oeste, y 20 msnm. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 19 °C a 36 °C y una precipitación promedio de alrededor de 1200 al año (CONAGUA 2021).

5.2 Material genético

El trabajo estuvo constituido por cuatro genotipos: Tacana, Comapa, Jamapa, Veracruz 8025. En el Cuadro 1, se describe la procedencia de los materiales.

Cuadro 1. Procedencia de los materiales de frijol.

Nombre de material	Estado	Institución	C.E.	LN	LW
--------------------	--------	-------------	------	----	----

Tacaná	Campeche	INIFAP	Edzná	19.84584000	-90.52838100
Comapa	Campeche	INIFAP	Edzná	19.84584000	-90.52838100
Jamapa	Campeche	INIFAP	Edzná	19.84584000	-90.52838100
Veracruz 8025	Campeche	INIFAP	Edzná	19.84584000	-90.52838100

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); C.E.=Campo Experimental; LN=Longitud norte; LW=Longitud oeste.

5.3. Características de los materiales

a). Negro Tacaná. Es una variedad mejorada desarrollada en el Campo experimental de Cotaxtla, Veracruz. Es de crecimiento erecto, tipo arbustivo con guías cortas. El ciclo de cultivo es corto, ya que su madurez es de 74 días. Es tolerante a enfermedades de la roya (*Uromyces phaseoli*) y mancha angular (*Phaeoisariopsis griseola*), resistente a mosaico común y mosaico dorado (virosis). Semilla pequeña ya que aproximadamente 100 semillas pesan aproximadamente 18 gramos, esta variedad se prefiere en entre los consumidores por ser pequeño y redondo (Luna, 2005).

b). Negro Comapa. Es una variedad con buen rendimiento llegando a obtener de 1287 a 1764 kg/Ha además de adaptarse en áreas tropicales, así como tolerancia al virus de mosaico dorado del frijol y resistencia al virus mosaico común y a la mancha angular. Esta variedad fue liberada además de ser registrada en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales con el número FRI-066-100910, y su siembra se recomienda primordialmente para el sureste de México. Negro Tacaná puede llegar a superar a genotipos mejorados experimentales y comerciales (López-Salinas, *et al.*, 2012).

c). Negro Jamapa. Liberada en 1958 por el INIFAP (Rosales *et al.*, 2004) el grano es preferido por consumidores del trópico, sin embargo, es susceptible a insuficiencias de humedad y a las principales enfermedades fúngicas como la roya (*Uromyces appendiculatus* var *appendiculatus* Unger) y la mancha angular (*Phaeoisariopsis griseola* Ferraris) y virales como el caso del Virus del Mosaico Amarillo Dorado (BGYMV) y el Mosaico Común del Frijol (BCMV) que están presentes en la región (Lepe-Soltero, *et al.*, 2012).

d). Negro 8025. El grano es de forma y tamaño similar a las variedades veracruzanas (tipo Jamapa), con alta demanda en el centro y sur del país. Tamaño de grano pequeño, con peso promedio de 21 gramos por 100 semillas. Planta con hábito de crecimiento indeterminado tipo III, de guías cortas, tamaño mediano; ciclo intermedio, es resistente a roya tolerante a antracnosis y bacteriosis (Acosta, *et al.*, 2018).

5.3 Detalle experimental

El experimento se estableció el día 15 de octubre del 2021 de forma manual. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones en un arreglo factorial 4 x 4, correspondiente a tres tratamientos de sequía y uno de riego para los dos cultivares (Figura 18). Cada parcela estaba constituida de siete macetas, separadas a 50 cm entre hilera y una separación de 30 cm entre macetas. Se depositaron tres semillas por maceta y después de la emergencia se aclareo a una planta por maceta.



Figura 18. Panorámica del experimento de variedades de frijol bajo estrés hídrico 2021. Chiná, Campeche, Camp., México.

5.4 Manejo del experimento

Al inicio del estudio se realizó el acondicionamiento del área donde se estableció el cultivo, como la eliminación de vegetación por dentro y fuera del invernadero. También se rehabilitó las paredes y el techo del invernadero al igual que su estructura a partir del 27 de septiembre al primero de octubre del 2021. Posteriormente se instaló una capa de plástico al suelo para después cubrirlo con piedra de tamaño medio con el fin de evitar el crecimiento de maleza. Se construyó seis bases de bambú, con una altura de 80 cm y tres metros de largo. Se utilizó como sustrato: tierra, arena y peat moss. Los sustratos se mezclaron y se utilizó en proporciones iguales para rellenar las bolsas de un metro de largo por 10 cm de circunferencia y colocadas dentro de un tubo de PVC de cuatro pulgadas, que posteriormente se utilizó para establecer los genotipos de frijol a una profundidad de cinco centímetros.

Al mezclar los sustratos se agregó fungicida y bactericida (40 gr de Oxiterra en 20 litros de agua). Las bolsas que contenían el sustrato se pesaron antes de agregar agua. Posteriormente se agregó agua para lograr un suelo a capacidad de campo (CC). Cuando el suelo presentaba su CC se pesó de nuevo la bolsa con el sustrato para obtener el peso a CC de cada bolsa donde se sembraron los genotipos de frijol. El 15 de octubre del 2021 se realizó la siembra de los genotipos. La emergencia de los genotipos se efectuó del 25 al 30 de octubre. El 1 de noviembre se inició con el registro de datos del cultivo.

En el control fitosanitario de plagas y enfermedades, se aplicó en el follaje de las plantas para combatir araña roja (*Tetranychus urticae*) una mezcla de 60 gramos de tabaco con un litro de agua junto con 10 gramos de jabón 2 veces por semana. También se utilizó aceite vegetal, para combatir hormigas, orugas, pulgones, cochinilla y ácaros mezclando 2 tasas de aceite vegetal con media taza de jabón líquido, aplicando la mezcla por la mañana 3 semanas después del día de emergencia 2 veces por 2 semanas

Al inicio del experimento se procedió a bajar la carga microbiológica del suelo, aunque también baja la tasa de microorganismos benéficos, igual se reduce la carga de patógenos en el suelo. Por lo que no se presentó ningún síntoma de enfermedad. Evitado el efecto Damping off causado por *Fusarium*, *Phythium* y *Rhizoctonia*. en uno de los estados más susceptible de la planta, después de la emergencia.

En la aplicación del agua en las plantas, se procedió a regar ambos bloques tres días a la semana, durante la etapa vegetativa. El riego se llevó a cabo de forma manual, llevando a capacidad de campo cada maceta hasta el día de la fase reproductiva dónde se suspendió el riego al bloque de sequía el día 29 de noviembre del 2021 hasta el 17 de diciembre del 2021. A partir de la suspensión del riego en el bloque de sequía, se procede a tomar la temperatura y pesar las macetas de ambos tratamientos, el bloque suministrado por el recurso hídrico, se dejó de llevar a capacidad de campo para solo suministrar lo evapotranspirado por la planta en relación al peso de la maceta.

5.5 Variables medibles

- A. Altura de planta; se registró al finalizar la floración, al medir desde la base del tallo en el suelo, sobre la hoja de mayor expansión de la planta de con una regla milimétrica.
- B. Numero de hojas trifoliadas por planta; se registró al contar el total de número de hojas en la planta.
- C. Número de flores por plantas; se registró al contar el número de flores expuestas en la planta.
- D. Número de vainas completas por planta; se obtuvo al contar el número de vainas completamente formadas en la planta.
- E. Número de semillas por vaina; se registró al contar el número de vainas en la planta.
- F. Peso seco de raíz; se obtuvo al pesar la raíz de cada planta después de que fueron sometidas a un proceso de secado en la estufa a una temperatura de 80 °C, que posteriormente fueron pesados en una báscula digital.

- G. Peso seco de tallo; se obtuvo al pesar el tallo de la planta después de que fueron sometidas a un proceso de secado en la estufa a una temperatura de 80 °C, que posteriormente fueron pesados en una báscula digital.
- H. Peso seco de hojas; se obtuvo al pesar todas las vainas de la planta después de que fueron sometidas a un proceso de secado en la estufa a una temperatura de 80 °C, que posteriormente fueron pesados en una báscula digital.
- I. Peso seco de vainas; se obtuvo al pesar todas las vainas de la planta después de que fueron sometidas a un proceso de secado en la estufa a una temperatura de 80 °C, que posteriormente fueron pesados en una báscula digital.
- J. Peso seco total de biomasa; se obtuvo al pesar todas las estructuras de la planta después de que fueron sometidas a un proceso de secado en la estufa a una temperatura de 80 °C, que posteriormente fueron pesados en una báscula digital.

5.6 Análisis estadístico

Cada una de las variables en estudio fue sometida a un análisis en el programa SAS (Statistical Analysis System, para Windows Versión 9.0) (SAS, 2002) en forma individual. Se calculó la diferencia mínima significativa (DMS de Tukey, $P \leq 0,05$) para la comparación de medias.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. RESULTADOS

6.1.1. Comportamiento de la temperatura

En la Figura 19, se observa que los genotipos de frijol estuvieron bajo una temperatura promedio de 26 °C de la siembra a la madurez fisiológica. También se muestra que la temperatura mínima se presentó durante los meses de diciembre 2020 a febrero 2021 con un promedio de 18 a 19 °C. Mientras que la temperatura máxima osciló entre 34 a 36 °C durante los meses de marzo a abril del 2021.

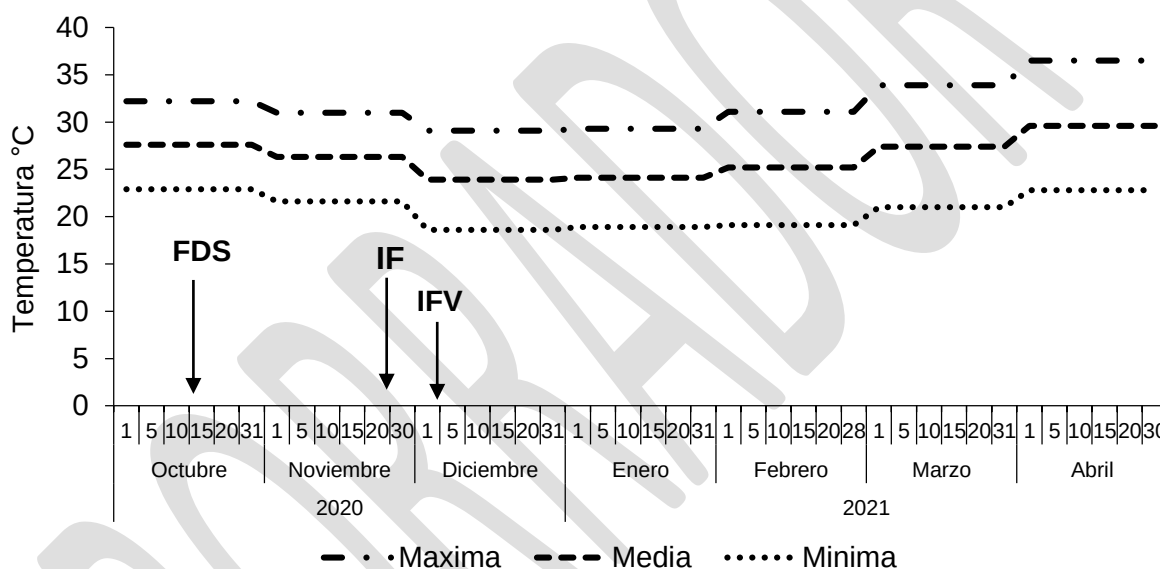


Figura 19. Comportamiento de la temperatura durante el experimento de genotipos de frijol bajo condiciones de estrés hídrico en 2020-2021. China, Campeche, Camp., México. FDS= Fecha de siembra; IF = Iniciación de floración; IFV = Iniciación de formación de vainas.

Durante la emergencia a iniciación floral, los genotipos presentaron una temperatura mínima promedio de 22 a 23 °C y una máxima de 31 a 32 °C. Mientras que de la iniciación floral a iniciación de formación de vainas se presentó una temperatura mínima promedio de entre 22 a 19 °C y una máxima de 30 a 31 °C. En el proceso de crecimiento y llenado de la vaina se presentó una temperatura promedio de 19 °C y una máxima de 29 °C.

6.1.2. Altura de planta.

En la Figura 20, se observa que el déficit hídrico no afectó la altura de las variedades de frijol Jamapa, 8025 y Tacaná, con excepción de Comapa que mostro numéricamente una menor altura de planta (ALP) por efecto del estrés hídrico.

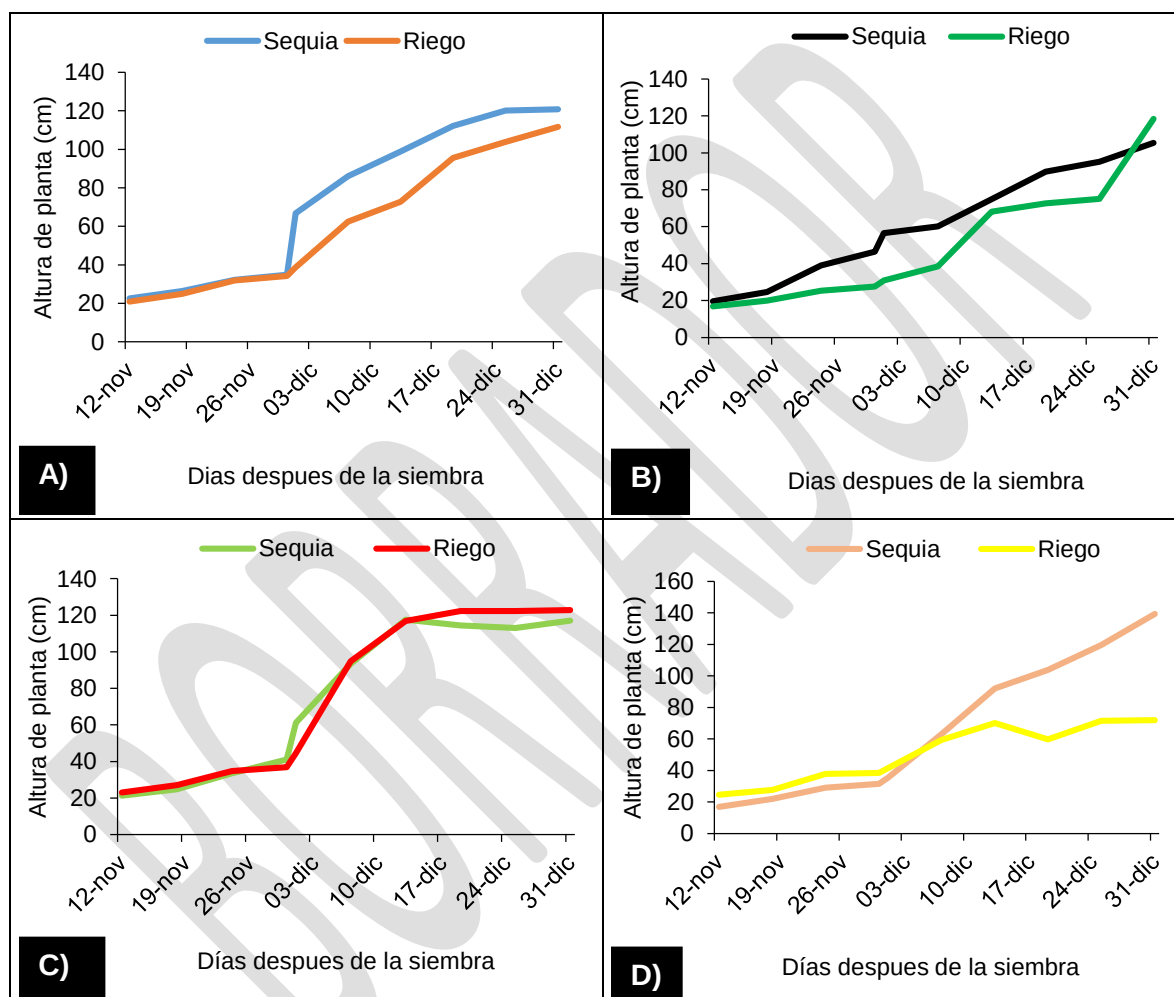


Figura 20. Altura de planta de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. A) Jamapa; B) 8025; C) Comapa; D) Tacaná. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

Al comparar los genotipos entre escenario de humedad; cuando las plantas se sometieron a sequía, la variedad que presentó menor ALP fue el frijol negro 8025. Mientras que Tacaná presentó la mayor ALP (Figura 21). En riego, la ALP fue mayor

en la variedad Comapa, seguida por 8025 (Figura 22). La menor ALP se observó en Tacaná.

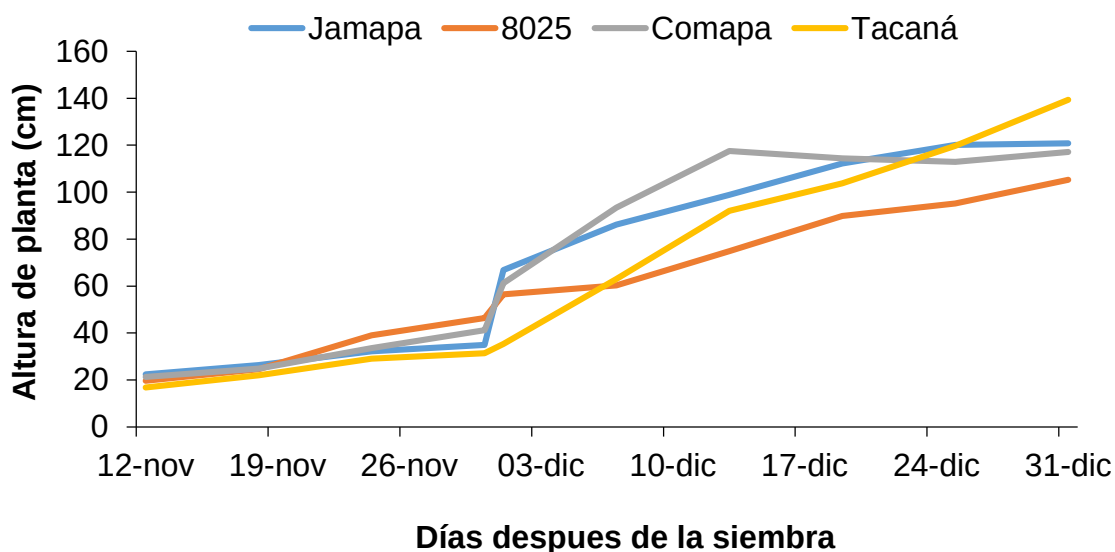


Figura 21. Altura de planta de frijol bajo sequía en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

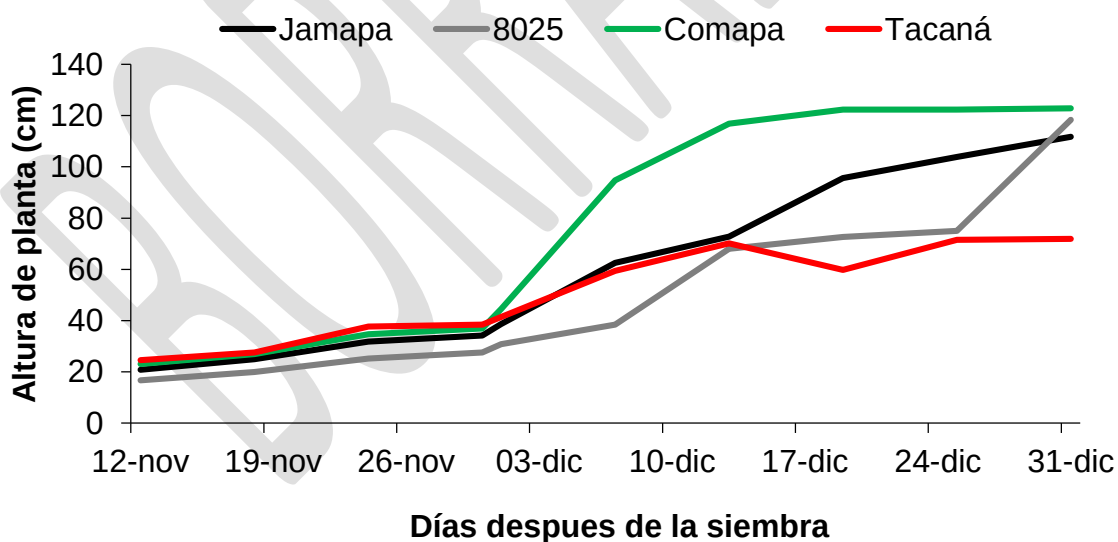


Figura 22. Altura de planta de frijol bajo riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.3. Número de hojas trifoliadas

El análisis de comparación de medias entre variedades de frijol, indica que el estrés hídrico no ($P \leq 0.05$) afectó el número de hojas trifoliadas por planta. Sin embargo, en la Figura 23 y 24 se aprecia que las plantas de frijol Jamapa y Comapa presentaron numéricamente un menor número de hojas por efecto del estrés hídrico. Mientras que las plantas menos afectadas en el número de hojas trifoliadas fueron la variedad 8027 y Tacaná.

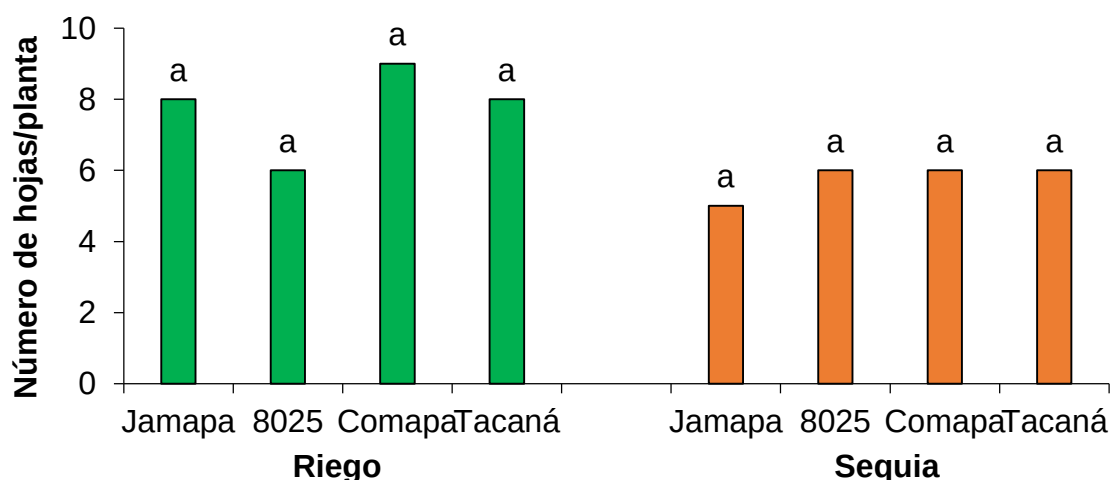


Figura 23. Número de hojas trifoliadas por planta de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

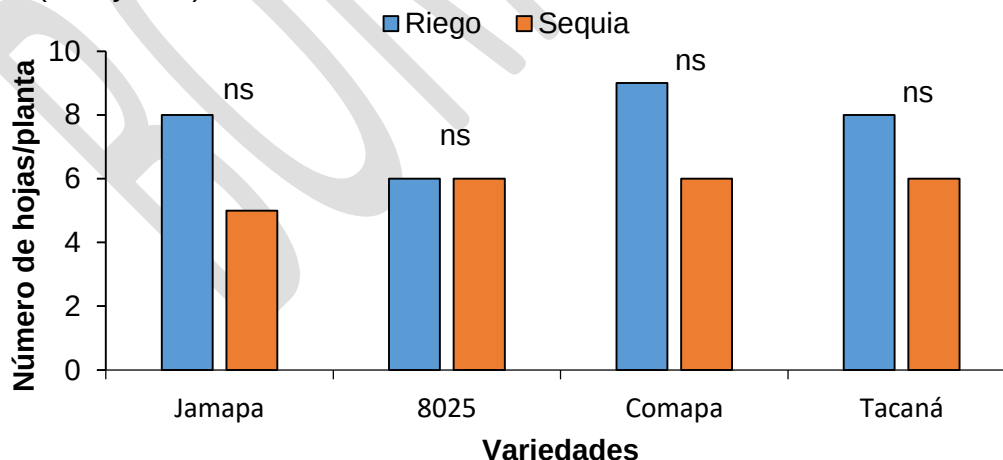


Figura 24. Número de hojas trifoliadas por planta de frijol bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

En relación al efecto de la humedad por modalidad se mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$). En la Figura 25, se observa que el déficit hídrico afectó la formación del número de hojas trifoliadas en la planta.

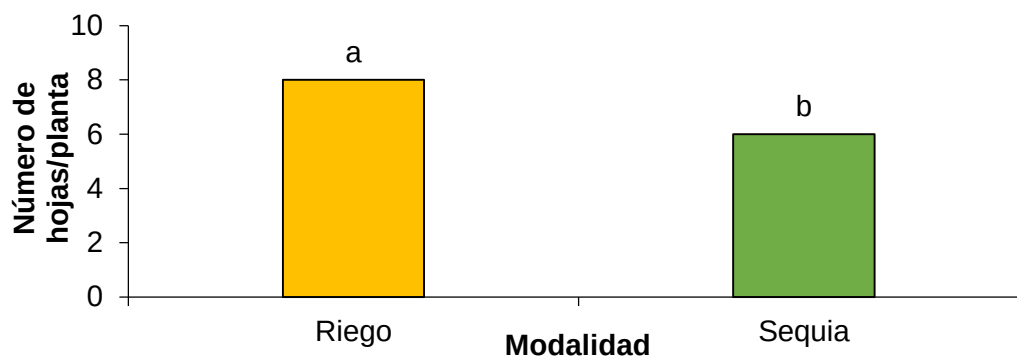


Figura 25. Número de hojas trifoliadas por planta de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.4. Número de vainas

El análisis de comparación de medias indica que no existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos para ambas modalidades de humedad para el número de vainas por planta (NVP) (Figura 26 y 28). Sin embargo, numéricamente la variedad Jamapa presentó el mayor NVP en riego y sequía, y la variedad Tacaná fue la que presentó menor NVP (Figura 26) para ambas modalidades de humedad.

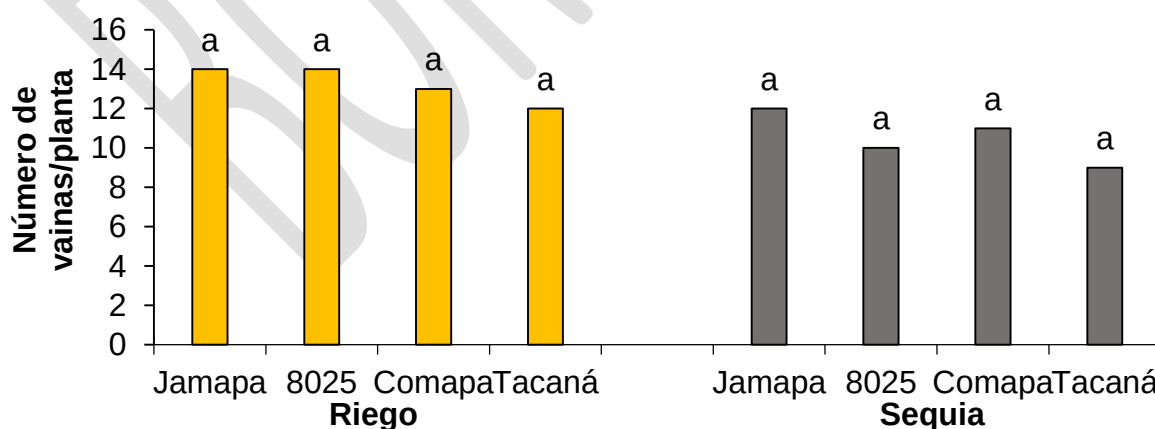


Figura 26. Número de vainas por planta de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).



Figura 27. Panorámica de altura de planta y vainas de variedades de frijol bajo condiciones de invernadero en 2021. Chiná, Campeche, Camp., México.

En la Figura 28, se observa que el déficit hídrico disminuyó estadísticamente el número de vainas por planta (NVP) de la variedad 8025. Mientras que las variedades: Jamapa, Comapa y Tacaná no presentaron diferencias ($P \leq 0.05$) significativas por el efecto del estrés hídrico. Sin embargo, numéricamente se muestra un menor NVP en las tres variedades por efecto del déficit hídrico (Figura 11). Al comparar el efecto de la humedad por modalidad, el análisis de comparación de medias indica diferencias ($P \leq 0.05$) significativas. Al presentarse en promedio una reducción del NVP por efecto del estrés hídrico (Figura 29).

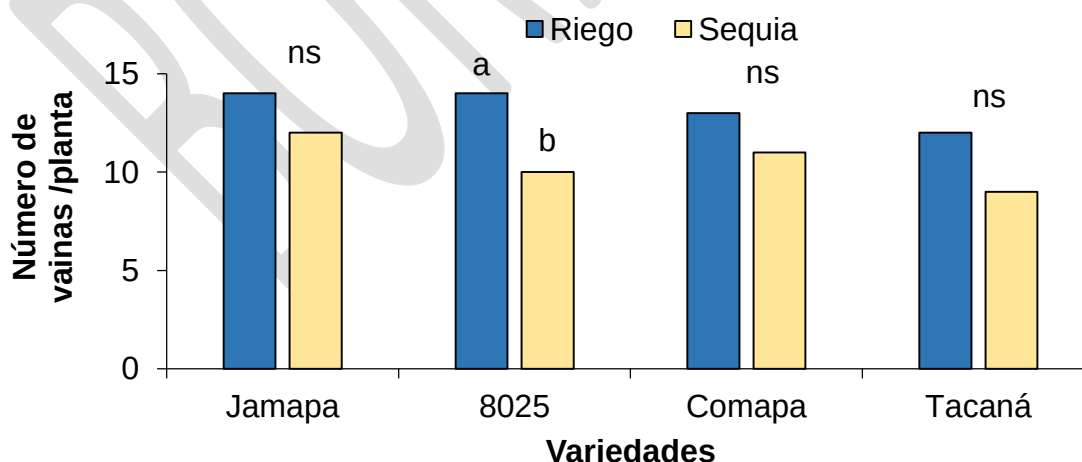


Figura 28. Número de vainas por planta de frijol bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

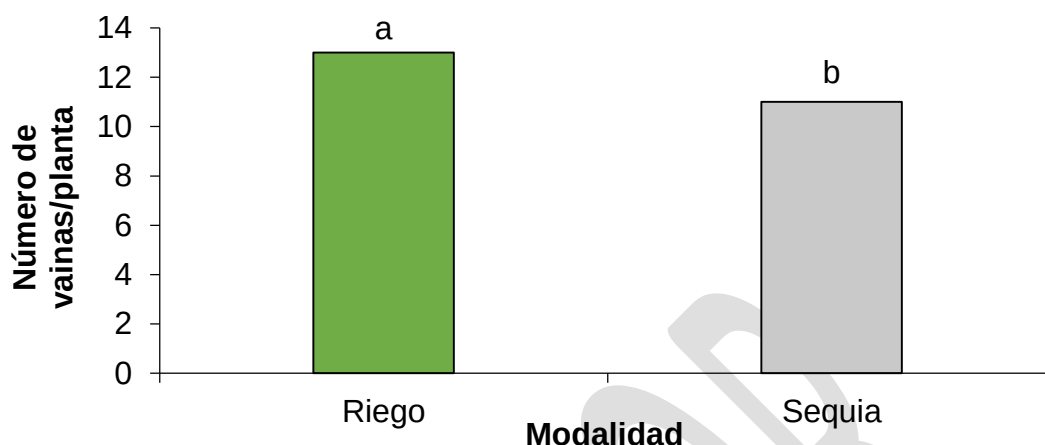


Figura 29. Número de vainas por planta de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.5. Número de semillas

Los resultados indican que entre variedades de frijol no existen diferencias ($P \leq 0.05$) significativas para el número de semillas por planta (NSP). Sin embargo, numéricamente la variedad Tacaná mostro menor NSP con y sin estrés hídrico (Figura 30). El efecto del estrés hídrico fue significativo para todas las variedades de frijol, al reducir el NSP (Figura 31). La mayor reducción de semillas se presentó en la variedad 8025 con 14 semillas por planta por efecto de la sequía.

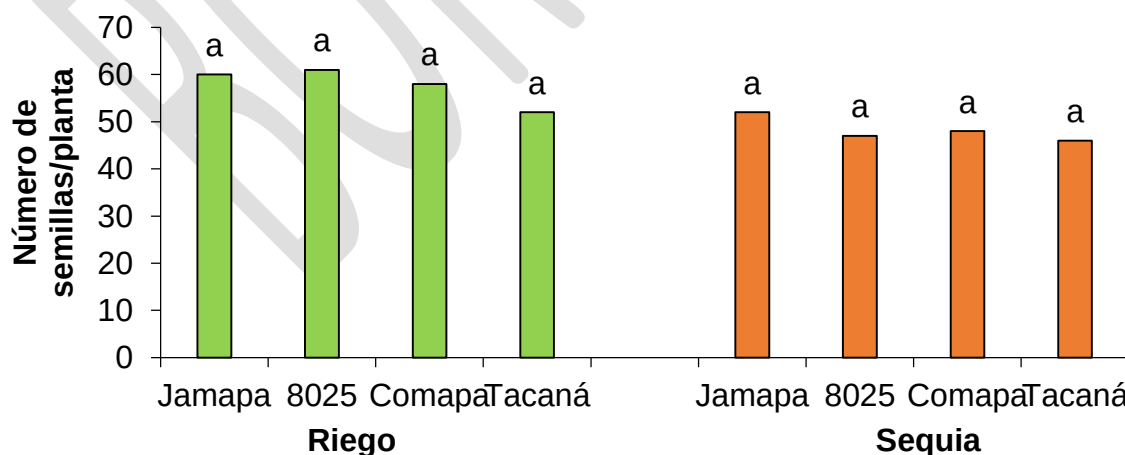


Figura 30. Número de semillas por planta de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

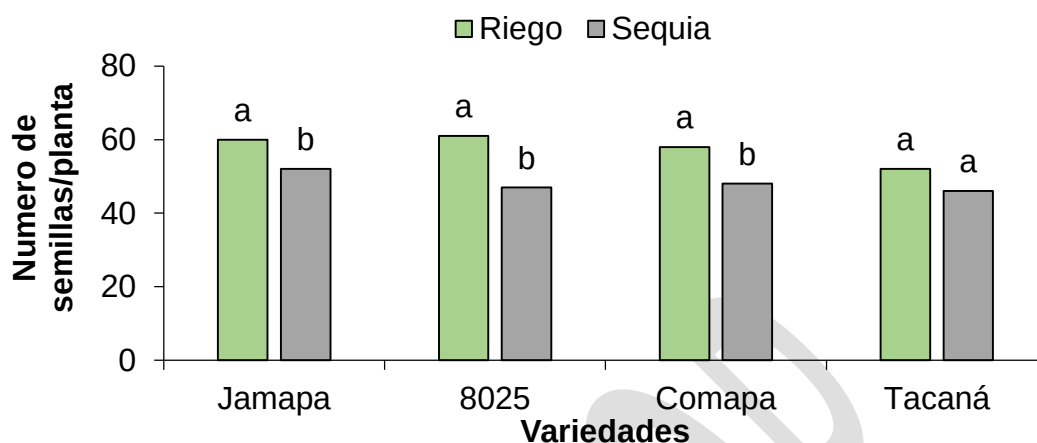


Figura 31. Número de semillas por planta de frijol bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

El análisis de varianza indica diferencias ($P \leq 0.05$) significativas para el efecto de la humedad por modalidad. Al presentarse en promedio una reducción del NSP por efecto del estrés hídrico (Figura 32).

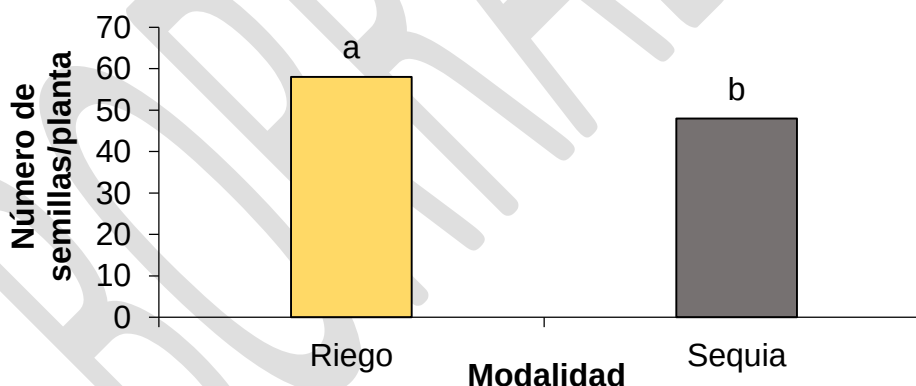


Figura 32. Número de semillas por planta de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.6. Peso seco de raíz

Los análisis de comparación de medias indican que no existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los tratamientos para ambas modalidades de humedad para el peso seco de raíz (PSR) (Figura 33). Sin embargo, numéricamente la

variedad Comapa presentó el mayor PSR en riego y sequía, y la variedad 8025 fue la que presentó menor PSR (Figura 33). También los resultados muestran que numéricamente: Comapa, Tacaná y 8025 con excepción de Jamapa presentaron disminución del PSR por efecto del estrés hídrico (Figura 34).

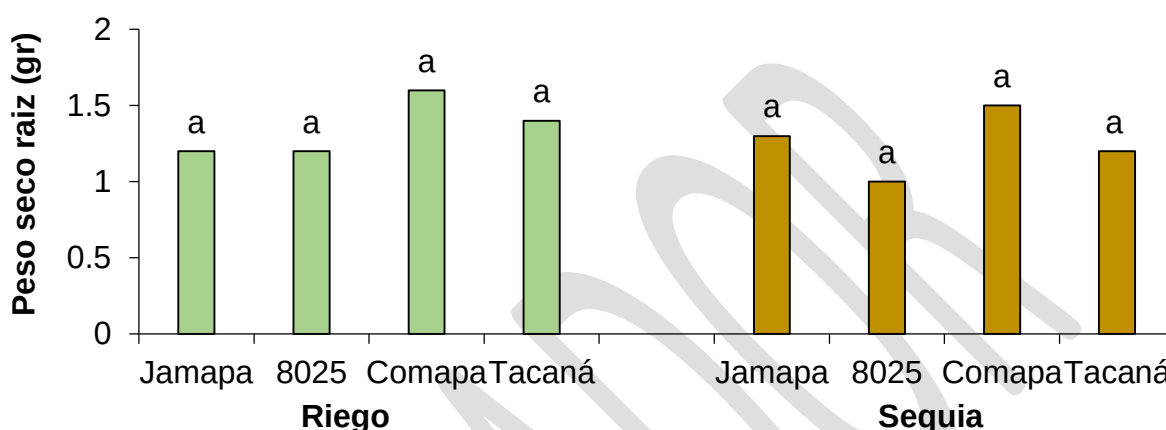


Figura 33. Peso seco de raíz de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

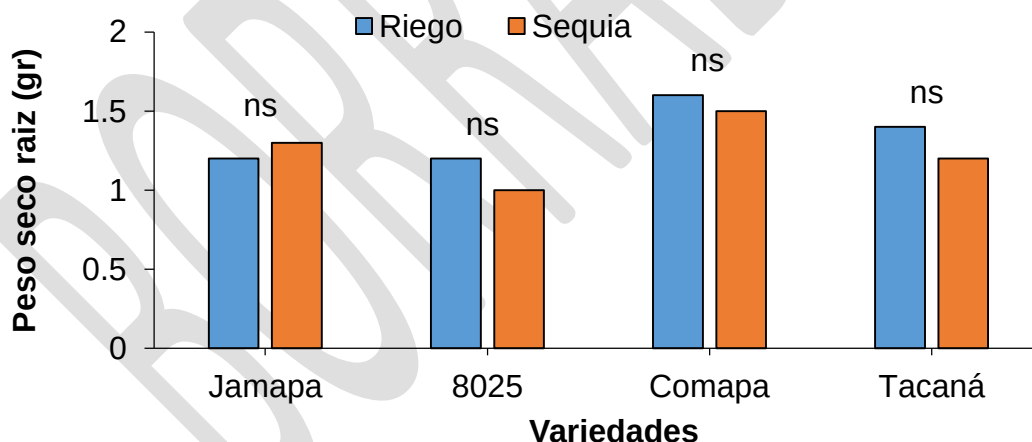


Figura 34. Peso seco de raíz de frijol bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

En relación a la comparación entre modalidad de humedad no se observaron diferencias significativas para PSR ($P \leq 0.05$) (Figura 35). Sin embargo, numéricamente se muestra que en promedio las variedades presentaron reducción del PSR por efecto del estrés hídrico.

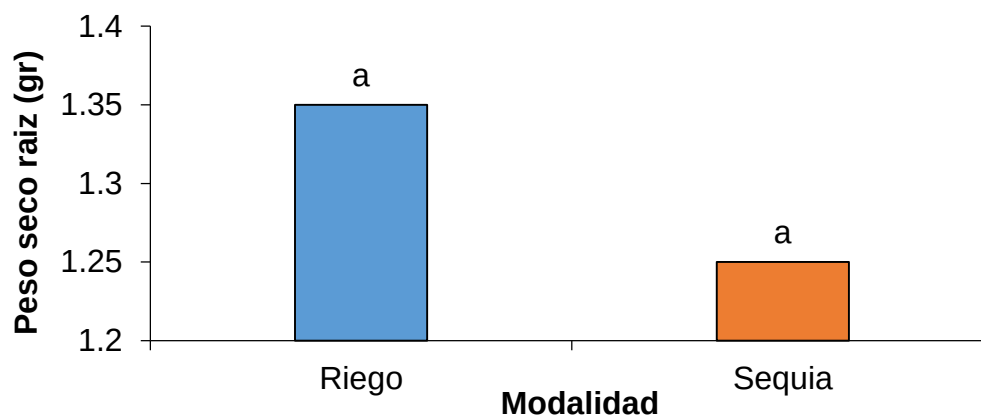


Figura 35. Promedio del peso seco de raíz de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.7. Peso seco de tallo

Las variedades de frijol presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) bajo déficit hídrico (Figura 36) para el peso seco de tallo (PST). Mientras que condiciones de riego, las variedades no presentaron diferencias significativas. También en la Figura 36, se observa que la variedad Comapa y Tacaná presentaron el mayor PST. Para el caso de las plantas sin déficit hídrico, numéricamente las variedades Jamapa y Tacana presentaron el mayor PST.

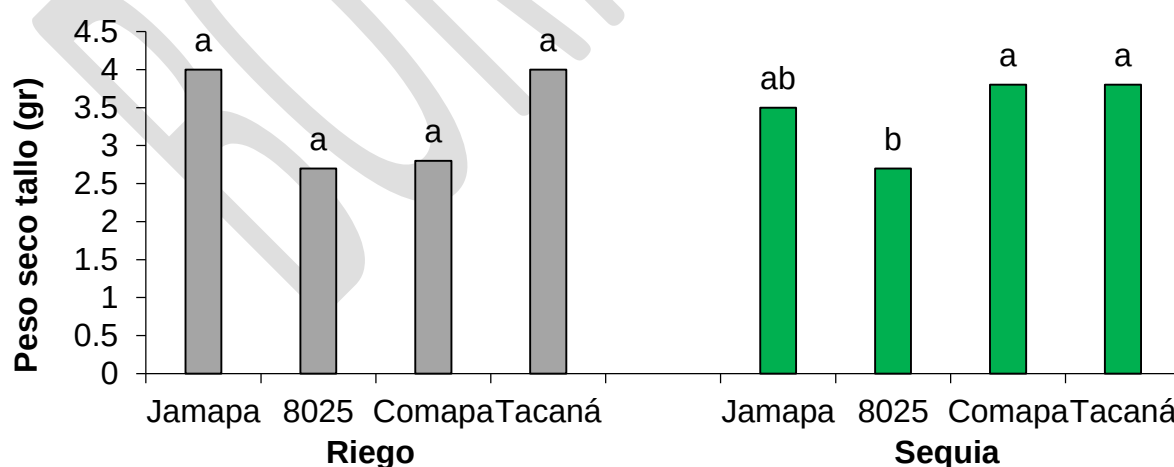


Figura 36. Peso seco de tallo de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

En relación a la comparación entre modalidades de humedad y genotipos, no se mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para el PST. Sin embargo, en la Figura 37 se observa que numéricamente las plantas de frijol Jamapa y Tacaná presentaron una reducción del PST por efecto del déficit hídrico. Cuando se comparó de forma conjunta entre modalidades de humedad, las variedades de frijol en promedio no presentaron diferencias significativas para el PST (Figura 38).

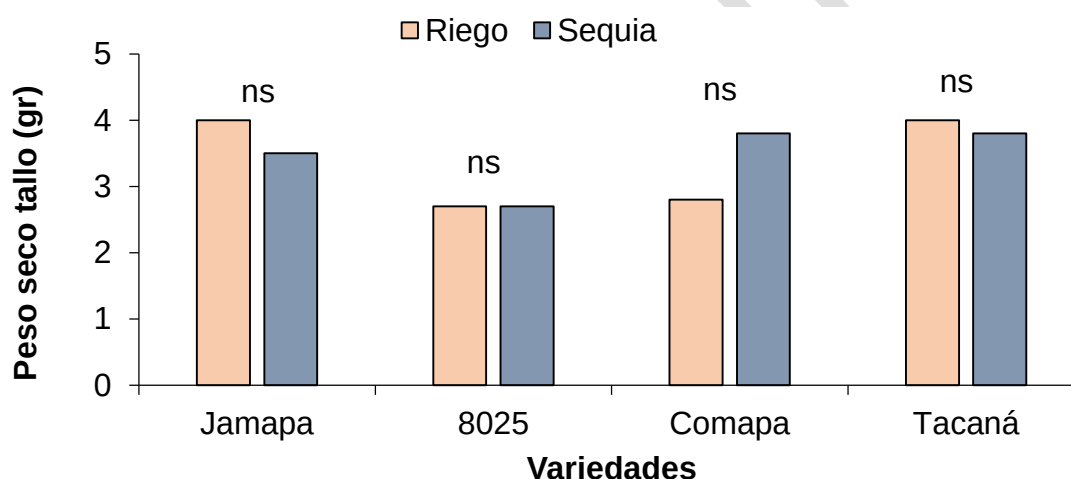


Figura 37. Peso seco de tallo de frijol bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

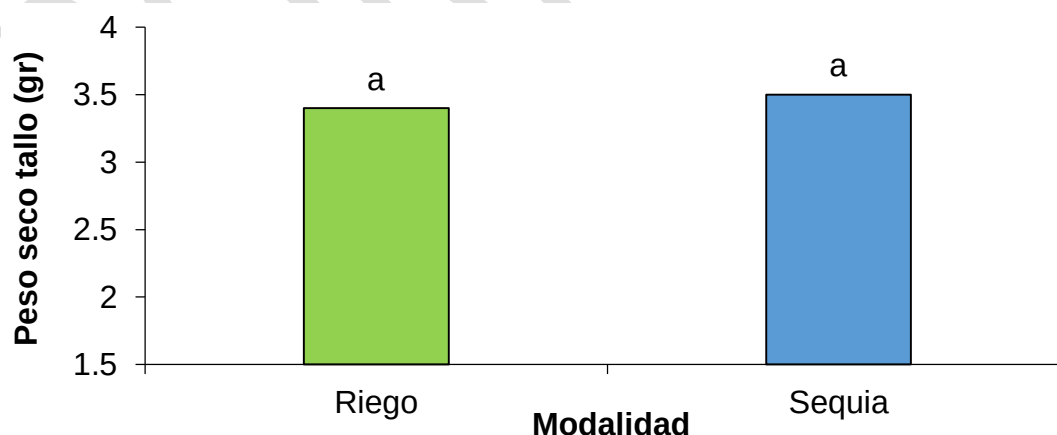


Figura 38. Promedio del peso seco de tallo de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.8. Peso seco hojas

El análisis de comparación de medias indica que no existen diferencias ($P \leq 0.05$) significativas entre genotipos para ambos déficits hídricos en el peso seco de hojas (PSH) (Figura 39). No obstante, numéricamente la variedad Tacaná presentó el mayor PSH bajo riego y Comapa en sequía. En la Figura 40, se muestra que numéricamente las variedades Jamapa y Tacaná presentaron una reducción del PSH por efecto del déficit hídrico. Los resultados indican que no existe diferencias ($P \leq 0.05$) significativas entre modalidades de humedad para el PSH (Figura 41).

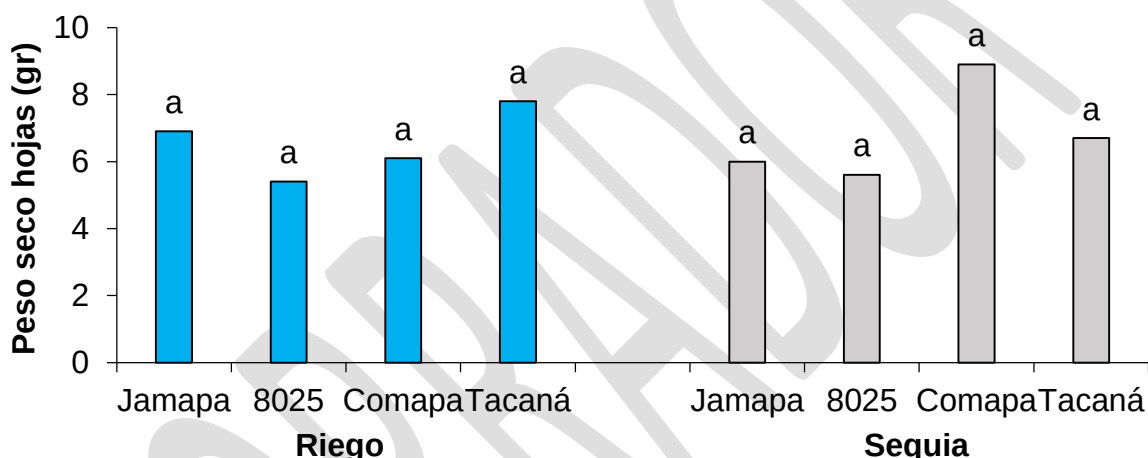


Figura 39. Peso seco de hoja de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

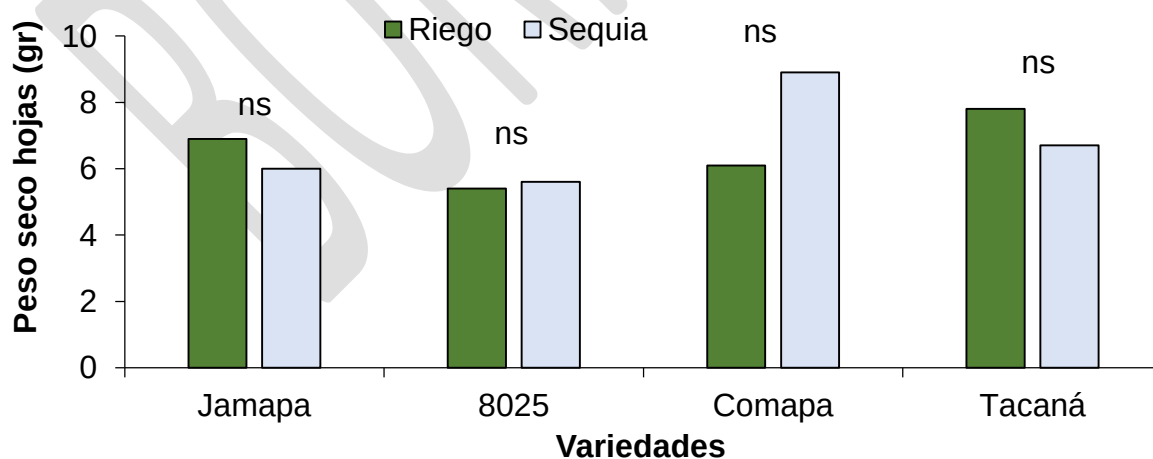


Figura 40. Peso seco de hoja de frijol bajo estrés hídrico y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

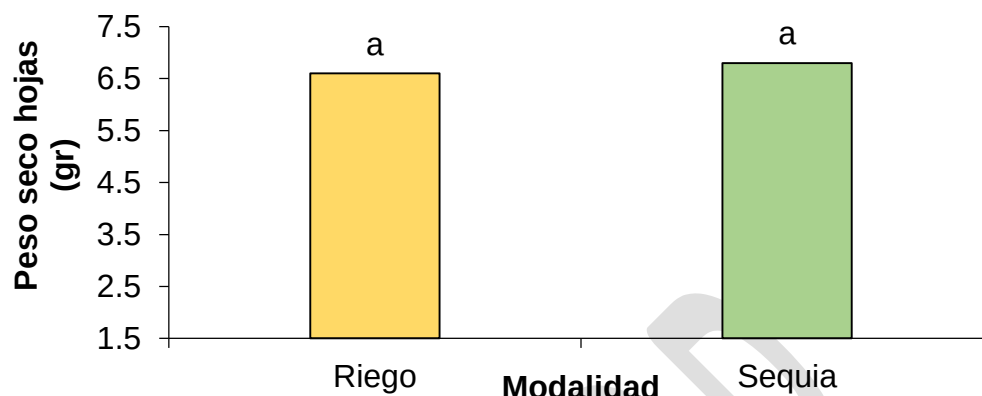


Figura 41. Promedio del peso seco de hoja de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.9. Peso seco de vainas

El análisis de comparación de medias no mostro diferencias ($P \leq 0.05$) significativas entre tratamientos para ambas modalidades de humedad (Figura 42 y 44). Sin embargo, las plantas que fueron sometidas a sequia presentaron numéricamente una variación en el PSV, al presentarse una menor producción de PSV en las variedades Negro 8025 y Comapa. Un comportamiento similar se presentó en la comparación del efecto del déficit hídrico y riego para todas las variedades de frijol, al no mostrarse diferencias significativas (Figura 43).

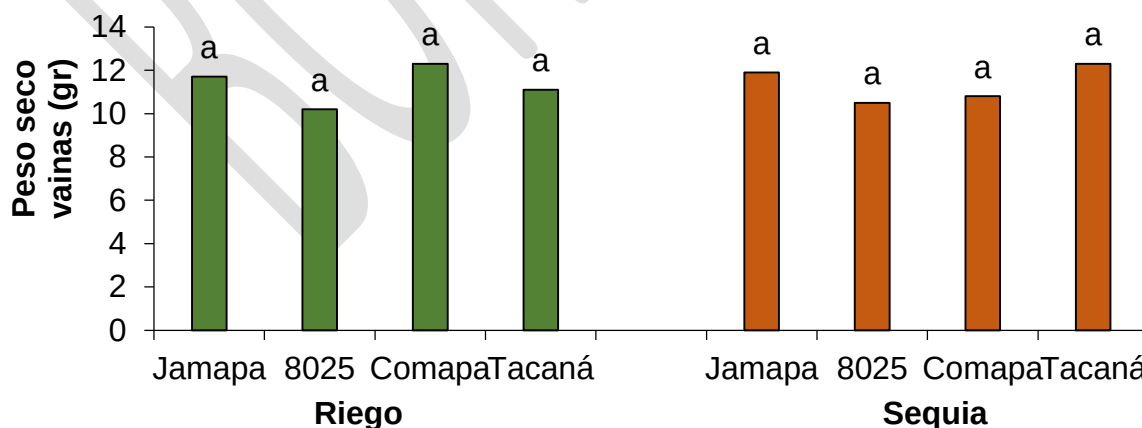


Figura 42. Peso seco de vainas de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

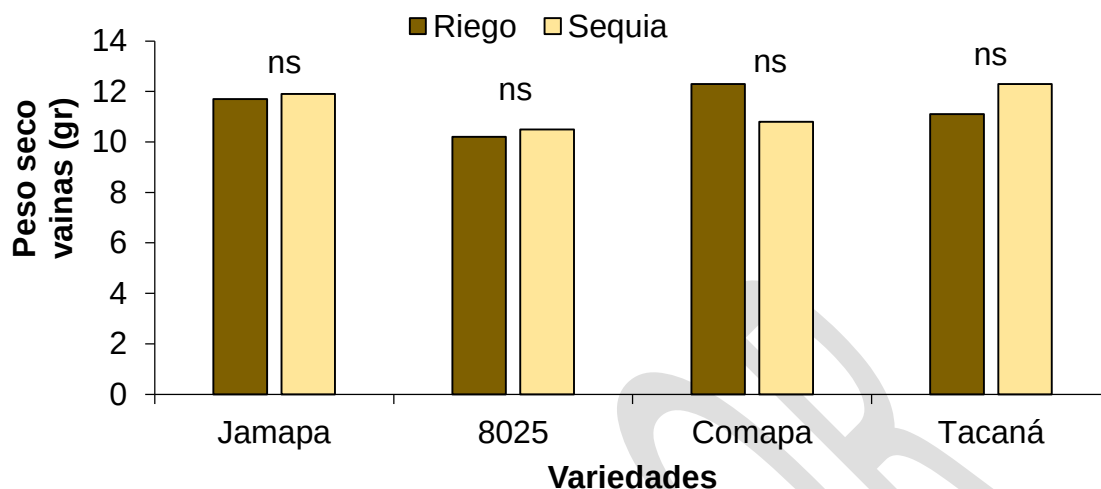


Figura 43. Peso seco de vainas de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05); ns=no significativo.

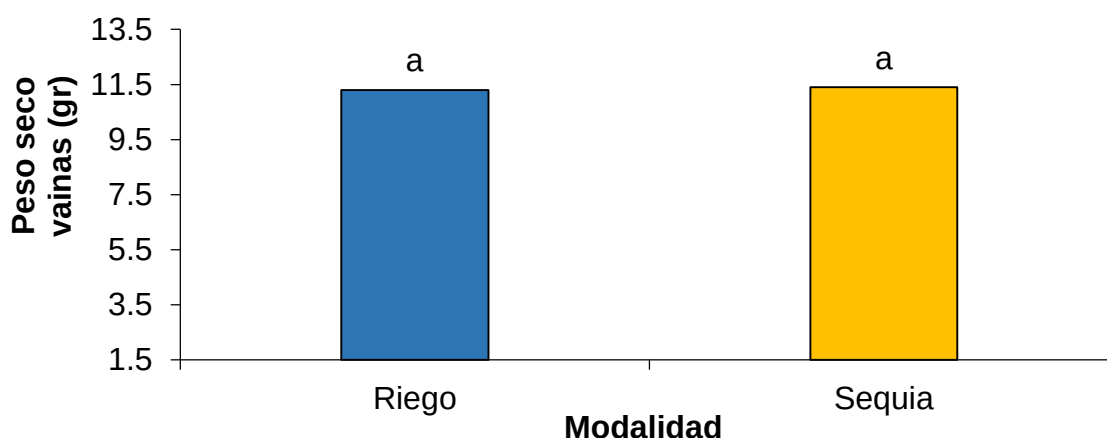


Figura 44. Promedio del peso seco de vainas de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.10. Peso seco total de biomasa

En la Figura 45, se observa que no se presentaron diferencias ($P \leq 0.05$) significativas para el peso seco total (PST) de materia seca entre variedades para ambas modalidades de déficit hídrico. Sin embargo, numéricamente la variedad 8025 presentó el menor PST en ambas modalidades de humedad. En la comparación del efecto del estrés hídrico (Figura 46) y por modalidad de humedad

(Figura 47), no se observaron diferencias ($P \leq 0.05$) significativas para el PST. No obstante, en la Figura 46 se muestra que numéricamente es estrés hídrico redujo el PST de las variedades Jamapa y Tacaná.

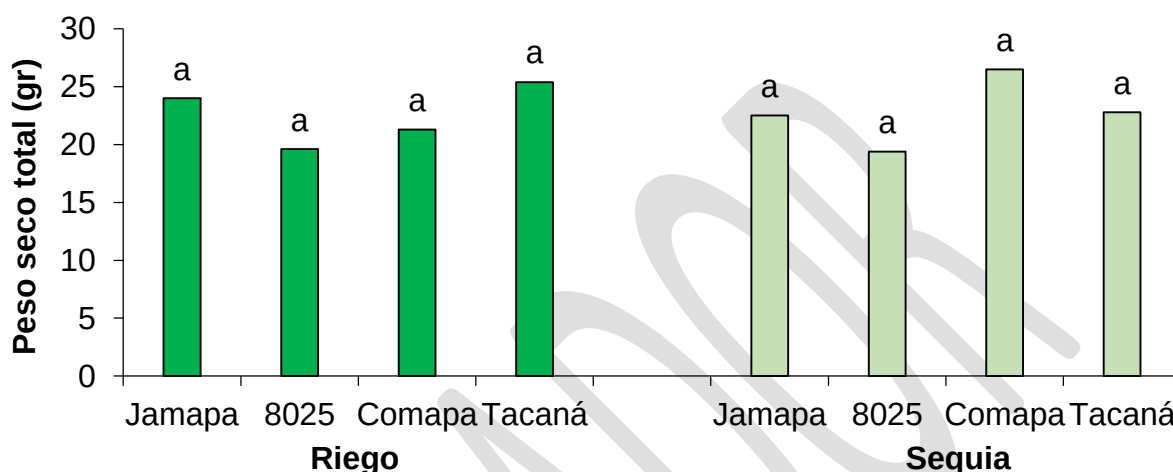


Figura 45. Peso seco total de las estructuras de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

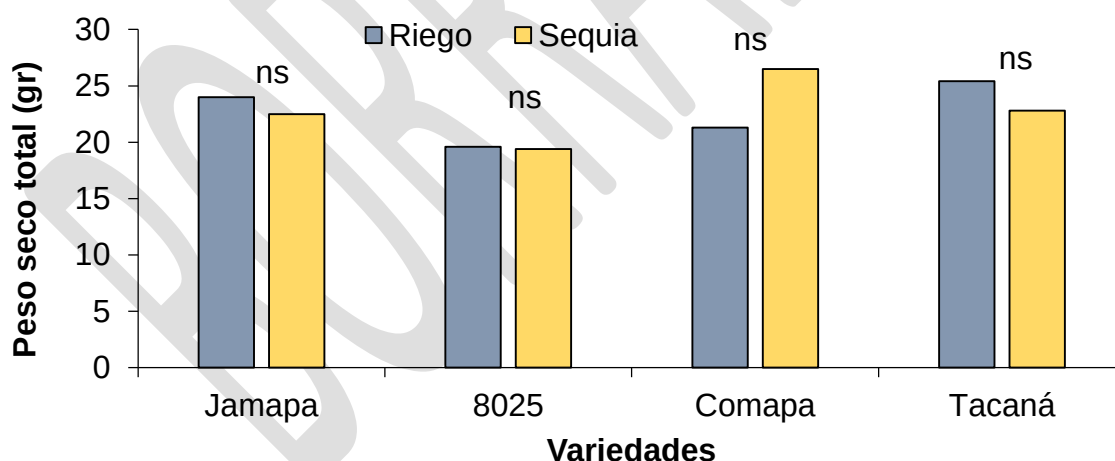


Figura 46. Peso seco total de las estructuras de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

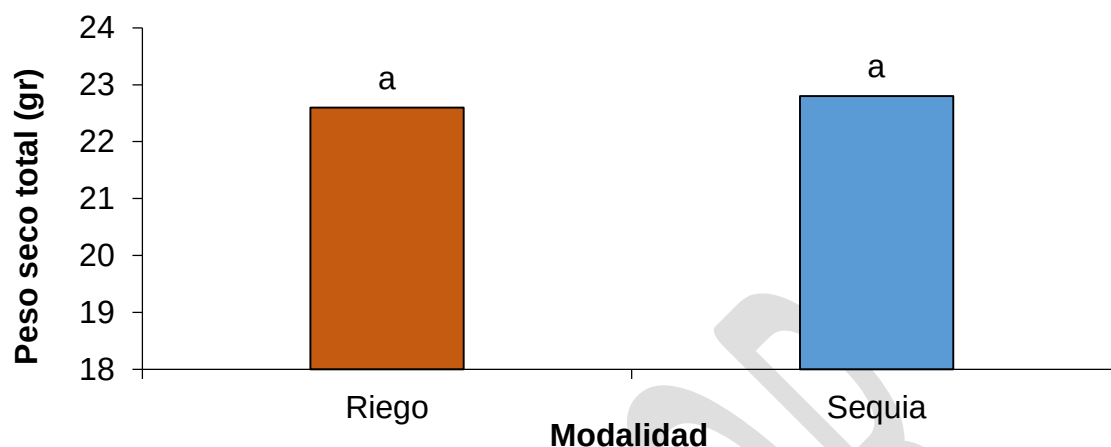


Figura 47. Promedio del peso seco de vainas de materiales de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.1.11. Longitud de raíz

Las variedades no mostraron diferencias ($P \leq 0.05$) significativas para la longitud de raíz (Figura 48). Resultados similares se mostraron para el efecto del estrés hídrico sobre las plantas de frijol de cada variedad (Figura 49) y por modalidad (Figura 50), al no observarse diferencias ($P \leq 0.05$).

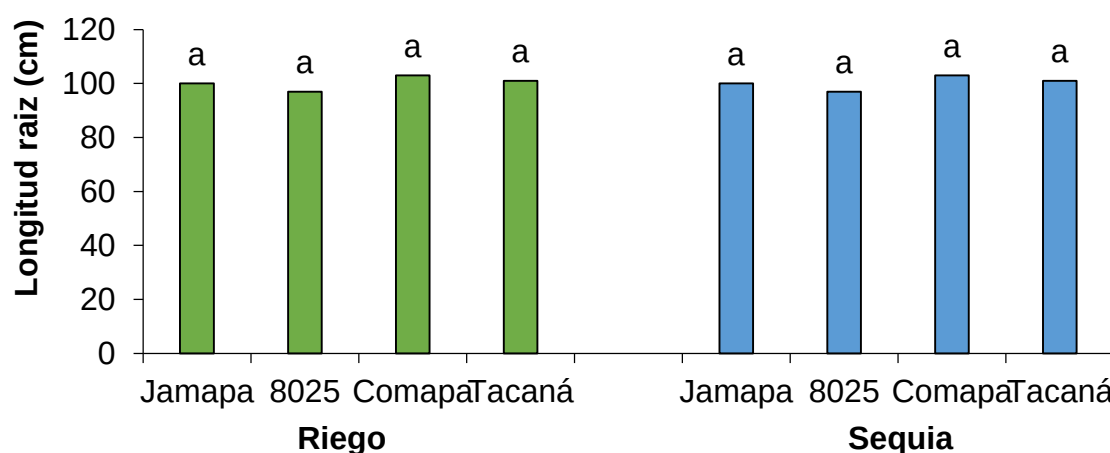


Figura 48. Longitud de raíz de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

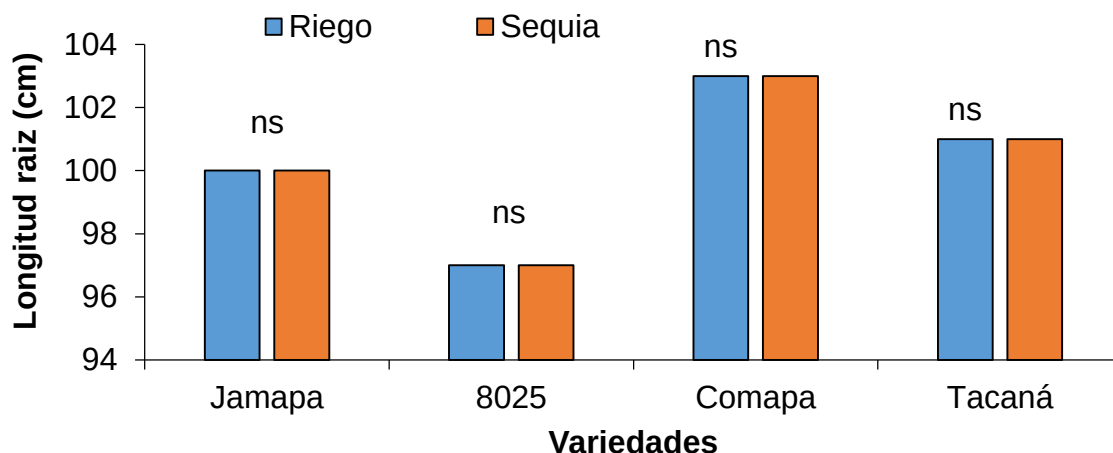


Figura 49. Longitud de raíz de frijol bajo sequía y riego en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

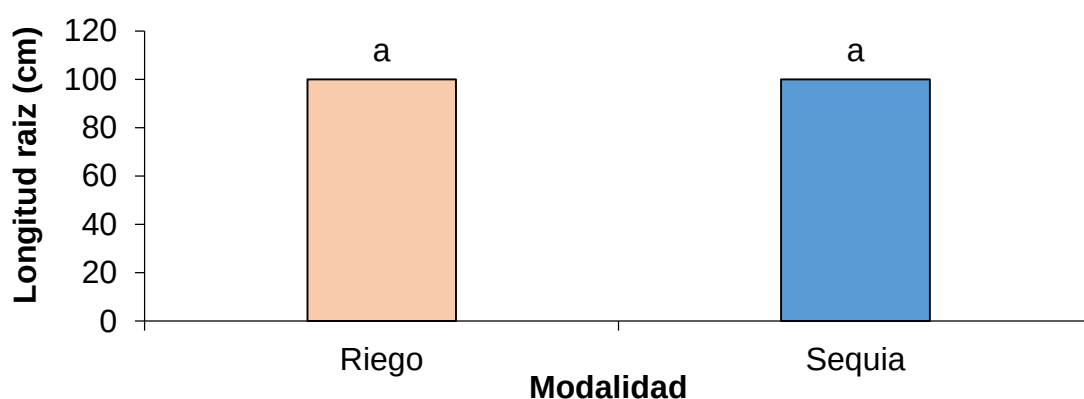


Figura 50. Longitud de raíz de frijol por modalidad en el estado de Campeche, Camp., México. Valores con la misma letra dentro de la figura son iguales entre sí (Tukey 0.05).

6.2. DISCUSIÓN

6.2.1. Altura de planta

Los resultados mostraron que el efecto del estrés hídrico no afectó a las variedades Tacana y Jamapa, con excepción la variedad Comapa, que numéricamente redujo la altura de planta (ALP) en un 6 % y en un 11 % a la variedad 8025 en comparación con las plantas con riego. La altura promedio que presentaron las cuatro variedades de frijol superaron en a la variedad Pinto Centauro que presentó una ALP de 102 cm cuando fue sometida a déficit hídrico en la etapa reproductiva. (Pedroza *et al.*,

2016), esta superioridad fue del, 3 % con 8025, 13 % con Comapa, 16 % con Jamapa y 27 % con Tacaná, respectivamente. En otro trabajo realizado sobre el efecto del déficit hídrico en la etapa vegetativa y reproductiva (Ranawake y Dahanayaka, 2012) indican que el estrés hídrico afectó significativamente la ALP, número de hojas, longitud de raíz y número de yemas florales medidos a las seis semanas después de la siembra (SDS), la etapa de floración y llenado de vainas del frijol (*Vigna radiata* L.). Solo el número de hojas se vio significativamente afectado cuando la sequía se aplicó a las ocho SDS. Además, la ALP, número de hojas y número de yemas florales por planta se vieron afectados significativamente por el estrés por sequía a las tres SDS.

El número de botones florales y el número de vainas no se vieron afectados por el estrés por sequía a las ocho SDS, aunque estos caracteres no tienen valor económico ya que la eficiencia de llenado de vainas es baja en frijol (*Vigna radiata* L.) bajo estrés por sequía (Ranawake y Dahanayaka, 2012). Emam *et al.* (2010) explica que la ALP de diversas variedades de frijol es afectada por el estrés hídrico, al tal grado que el estrés por sequía tiene un impacto considerable en el crecimiento del frijol y el rendimiento de la semilla, aunque los rangos de reducción son muy variables debido a las diferencias en el momento y la intensidad del estrés impuesto y el genotipo utilizado (Emam *et al.*, 2010).

6.2.2. Número de hojas trifoliadas

El estrés hídrico afectó el desarrollo de hojas en la planta de frijol, al reducir en la variedad Jamapa y Comapa tres hojas y en Tacaná dos hojas, con acepción de la variedad 8025 donde se desarrollaron seis hojas para ambas modalidades de humedad. Resultados similares observaron Reyes *et al.* (2014) al estudiar el efecto del estrés hídrico en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *Phaseolus coccineus* L.). Ellos observaron que el estrés hídrico en plantas de *Phaseolus vulgaris* L. no afectó el número de hojas (NUH), ramas y estructuras reproductivas, excepto para el tratamiento de 50% de agua. El 75% de agua estimuló el área foliar. Los

tratamientos de sequía afectaron todos los órganos vegetativos, pero no los órganos reproductivos. También, el estrés hídrico en plantas de *Phaseolus coccineus* L. afectó el NUH, ramas y estructuras reproductivas. El 75 y 50% de agua no influyeron en el área foliar. Los tratamientos afectaron todos los órganos de las plantas.

Acosta y Adams (1991) indican que en el frijol existen muchos rasgos comunes que se ven afectados por el estrés hídrico, incluido un número reducido de hojas, un tamaño reducido de las hojas y la inhibición de la expansión del follaje, el desprendimiento de hojas, flores y frutos jóvenes (Adams *et al.*, 1985). La reducción del área foliar, es decir, la superficie fotosintética, da como resultado una disminución en la acumulación de materia seca (Costa *et al.*, 2000).

6.2.3. Número de vainas

Estudios posteriores indican que el estrés por sequía, es causado por la baja disponibilidad de agua en el suelo, modificando negativamente la productividad del frijol. Esta es afectada dependiendo de la intensidad, duración de la escasez de agua y de la rapidez con la cual se alcance dicha intensidad y además de la etapa fenológica en que el efecto ocurra, así como el preacondicionamiento de la planta (Hsiao, *et al.*, 1976; Begg y Turner). La intensidad de la sequía ocasionada en el presente estudio sobre las plantas de frijol en la etapa reproductiva repercutió sobre el desarrollo de vainas, al reducir un 28 % el número de vainas por planta en la variedad de frijol negro 8028. Mientras que en la variedad Tacana el estrés hídrico redujo el número de vainas en un 25 %. En cuanto a las variedades Jamapa y Comapa el efecto de la sequía fue de 15 %. Otros estudios señalan que el frijol es extremadamente sensible al estrés hídrico y al calor presente con frecuencia en forma simultánea en las etapas fenológicas más sensitivas de la planta: para la formación del rendimiento en el inicio de la floración, inicio de crecimiento de las vainas y llenado de grano en las áreas de secano; este tipo de estrés abiótico disminuye el rendimiento y calidad de la producción (Rainey y Griffiths, 2005). Miranda y Belmar (1997) realizaron un estudio del déficit y frecuencia de riego en

frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) encontraron que hubo un efecto significativo sobre el rendimiento en la disminución de grano, el número de vainas por planta debido al déficit de humedad del suelo durante los estadios de crecimiento, floración y formación de grano.

6.2.4. Número de semillas

El desarrollo de variedades de frijol resistentes a condiciones de estrés por sequía a través del mejoramiento es una estrategia útil para aumentar la seguridad alimentaria en áreas marginales. Los programas de mejoramiento para mejorar la resistencia a la sequía generalmente seleccionan los mejores genotipos con base en el rendimiento de grano bajo estrés por sequía (Rosales *et al.*, 2012). Un enfoque fisiológico que utilice rasgos morfofisiológicos como criterio de selección puede aumentar la posibilidad de combinar progenitores con rasgos complementarios, siempre que el germoplasma se caracterice más a fondo que solo las pruebas de rendimiento (Mir *et al.*, 2012).

En el presente trabajo, el estrés hídrico afectó negativamente la formación de semillas por planta en un 17 %, que equivale a un promedio de 10 semillas por planta en cada variedad de frijol. En relación al efecto del estrés hídrico por variedad, la intensidad de la sequía redujo el número de semillas por planta en un 13 % para Jamapa, 17 % para Comapa y 23 % para 8025, con excepción de Tacaná que no sufrió cambios; sin embargo, esta variedad fue la que presentó numéricamente menos semillas por planta cuando las plantas no sufrieron estrés hídrico, al observarse una diferencia inferior del 10 % para Comapa, 13 % para Jamapa y 15 % sobre 8025, respectivamente. Resultados similares fueron obtenidos por Xia (1997) al observar que el déficit hídrico impuesto durante el desarrollo reproductivo disminuyó el número de flores, vainas y número de semillas por vaina. Otros autores señalan que el número total de flores en algunas variedades puede reducirse significativamente en condiciones de sequía, lo que

reduce el número de vainas por planta (Pérdida *et al.*, 1997). La retención de agua a las plantas en la iniciación floral y en la etapa de vaina del 50% conduce a tasas de aborto de la vaina del 21 y 65%, respectivamente (Mwanamwenge, *et al.*, 1999).

6.2.5. Peso seco de raíz

El estudio mostro que el estrés hídrico no afecto la producción de materia seca de raíz en las variedades; sin embargo, numéricamente podemos mencionar que el déficit hídrico en promedio redujo 7.5 % el peso seco de raíz de todas las variedades de frijol. Mientras que, de forma individual por variedad, la sequía redujo numéricamente el peso seco de raíz en un 6 % para Comapa, 14 % sobre Tacaná y 17 % para 8025. Mientras que en la variedad Jamapa, el estudio mostro que el estrés hídrico aumento el peso seco de raíz en un 8 % en comparación con las plantas que no sufrieron sequía. Numéricamente la variedad de frijol Comapa superó en un 12 % al frijol Tacaná y en un 25 % a las variedades Jamapa y 8025 en relación al peso seco de raíz cuando las plantas estuvieron en riego. Mientras que cuando sufrieron sequía, esta misma variedad superó en un 13 % a Jamapa, 20 % a Tacaná y con un 33 % a la variedad 8025. Estudios realizados en invernadero en la Universidad de Hohenheim (Amede y Schubert, 2005), Alemania, para determinar si el mantenimiento de un alto potencial hídrico de la planta en frijol común bajo estrés era función de la regulación estomática y/o del crecimiento de la raíz. Observaron que una sequía leve de siete días (-0.15 MPa) disminuyó el potencial hídrico a -0.35 y -0.89 MPa, acompañado de una disminución de materia seca de 25 y 15% en frijol común y garbanzo, respectivamente. También indican que la mayor disminución de materia seca en el frijol común se debió a la reducción de la fijación de CO₂, por lo que la fotosíntesis se redujo en un 75 % en el frijol común, pero solo en un 20 % en el garbanzo y se concluyó que el alto potencial hídrico de las plantas de frijol común bajo estrés no se debió al ajuste osmótico sino a la función de una regulación estomática efectiva y un sistema radicular robusto.

6.2.6. Peso seco de tallo

El estrés aplicado a todas las variedades de frijol en etapa reproductiva aumento numéricamente el peso seco de tallo en un 3 %. Con el presente estudio se pudo observar que las variedades sufrieron una modificación en el peso seco del tallo por la sequía, a tal grado que dos de las cuatro variedades valoradas el déficit hídrico disminuyo el peso seco del tallo y en otro aumento el peso seco del tallo y en otra no se mostraron cambios. En este sentido, el déficit hídrico aumento en un 26 % el peso seco del tallo de la variedad Comapa y una reducción del peso seco de tallo del 5 % para Tacaná y 12 % para Jamapa por efecto de estrés hídrico. Cuando las plantas no sufrieron sequía, numéricamente la variedad Tacána y Jamapa superaron en un 30 % a la variedad Comapa y con un 32 % a la variedad 8025 en relación al peso seco de tallo. Mientras que cuando las plantas presentaron sequía, la Comapa y Tacaná fueron superiores en un 8 % sobre Jamapa y con un 29 % sobre la variedad 8025, respectivamente.

Polonia *et al.* (2016) señala que la sequía provoca graves pérdidas de rendimiento en este cultivo. La identificación de rasgos asociados a la resistencia a la sequía contribuye a mejorar el proceso de generación de genotipos de frijol adaptados a estas condiciones. Para ello, estos autores realizaron estudios de campo en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia, para determinar la relación entre el rendimiento de grano y diferentes parámetros como el uso efectivo del agua (EUW), la biomasa del dosel y los índices de partición seca (índice de partición de la vaina). índice de cosecha e índice de cosecha de vainas) en líneas élite de frijol seleccionadas por su resistencia a la sequía durante la última década. Encontraron que la resistencia a la sequía en el frijol común está relacionada con EUW para producir una mayor biomasa de dosel (tallos, hojas y vainas), combinada con una mayor partición de materia seca de las estructuras vegetativas a las vainas y, posteriormente, a la producción de grano, lo que resulta en valores más altos de vaina y numero de semillas por área.

6.2.7. Peso seco de hoja

Todas las variedades presentaron un efecto similar al ocurrido en peso seco de tallo, al mostrarse que la sequía aplicada a todas las variedades de frijol en etapa reproductiva aumento numéricamente el peso seco de hojas por planta en un 3 %. También el estudio mostro que las variedades sufrieron una modificación en el peso seco de las hojas por la sequía, a tal grado que dos de las cuatro variedades, el déficit hídrico disminuyo el peso seco de hojas y en dos más el peso seco de hojas aumento. En este contexto, el déficit hídrico aumento el peso seco de las hojas de la variedad 8025 en un 4 % y en un 31 % sobre la variedad Comapa, y una reducción del peso seco de las hojas del 13 % para Jamapa y 14 % para Tacaná por efecto de estrés hídrico. Además, el presente trabajo evidencio que cuando las plantas no sufrieron sequía, numéricamente la variedad Tacána superó en peso seco de hojas por planta a la variedad Jamapa en un 11 %, 22 % a Compa y con un 31 % a la variedad de frijol 8025. Mientras que cuando las plantas presentaron sequía, la variedad Compa superó a todas las variedades en el peso seo de hojas. Esta superioridad fue del 25 % sobre Tacaná, 32 % para Jamapa y con un 37 % sobre la variedad 8025. Estudios realizados en frijol sobre el efecto del estrés hídrico (Emam *et al.*, 2010) indican que la introducción del estrés por sequía redujo el área foliar, el contenido de clorofila, la materia seca y el rendimiento en dos cultivares de frijol común (D81083 y Sayyard) en Irán (Emam *et al.*, 2010). El estrés por sequía posterior a la floración resultó en una reducción en el rendimiento de semillas, vainas por planta y peso de 100 semillas en frijol común de semilla roja pequeña (Rezene *et al.*, 2013). El estrés por sequía redujo la tasa fotosintética debido a la conductancia estomática en el estudio realizado en frijoles (Zlatev y Yordanov, 2004).

6.2.8. Peso seco de vainas

Todas las variedades presentaron un efecto similar al ocurrido en las estructuras de tallo y hojas, al mostrarse que el déficit hídrico aplicado a todas las variedades de

frijol en etapa reproductiva aumento numéricamente el peso seco de vainas por planta en 1 %. Además, se observó que las variedades sufrieron una modificación en el peso seco de las hojas por la restricción de humedad, a tal grado que una de las cuatro variedades, el déficit hídrico disminuyó el peso seco de vainas y en tres más el peso seco de vainas aumento. En este contexto, el déficit hídrico aumento el peso seco de las hojas en un 2 % sobre la variedad Jamapa, 3 % para 8025 y un 10 % para la variedad Tacaná, y una reducción del peso seco de las hojas del 12 % para Comapa por efecto de estrés hídrico. También con el estudio se logró observar que cuando las plantas no sufrieron sequía, numéricamente la variedad Comapa superó en peso seco de vainas por planta a la variedad Jamapa en un 11 %, 10 % para Tacaná y con un 17 % sobre la variedad 8025. Mientras que cuando las plantas presentaron sequía, la variedad Tacaná superó numéricamente a todas las variedades en el peso seco de hojas. Esta superioridad fue del 3 % sobre Jamapa, 12 % para Comapa y con un 15 % sobre la variedad 8025. Wallace (1980) señala que la calidad de la semilla de frijol (dureza), así como el vigor y el rendimiento de materia seca, se ven afectados negativamente por la escasez de agua (Halterlein y Bean, 1983).

La reducción del rendimiento de grano por estrés hídrico en plantas de frijol ha sido reportada en varios estudios (Rosales, *et al.*, 2004; Boutraa y Sanders, 2001). Cuando el estrés hídrico ocurre durante la etapa de floración, la reducción tiende a ser más pronunciada (Miller y Burke, 1983) debido al alto consumo de agua del cultivo durante la floración (Silveira, *et al.*, 1984). La sensibilidad al estrés hídrico es mayor durante la fase reproductiva (floración y formación de vainas) que durante la fase de crecimiento vegetativo (Doorenbos y Pruitt, 1976)

6.2.9. Peso seco total de biomasa

La sequía ocasiono que todas las variedades de frijol en etapa reproductiva aumentaran numéricamente el peso seco total de biomasa por planta en 1 %.

También, se observó que las variedades presentaron una modificación en el peso

seco de las hojas por la sequía, a tal grado que tres de las cuatro variedades, el déficit hídrico disminuyó el peso seco total de biomasa y en una más el peso seco total de biomasa aumentó. En este contexto, el déficit hídrico aumentó el peso seco total de biomasa en un 20 % en la variedad Comapa y una reducción del peso seco de la biomasa de 1 % para la variedad 8025, 6 % para Jamapa y 10 % para Tacaná, respectivamente. Además, el estudio evidenció que cuando las plantas no sufrieron sequía, numéricamente la variedad Tacaná superó en peso seco total de biomasa por planta a la variedad Jamapa en un 5 %, 16 % para Comapa y 23 % sobre la variedad 8025. Mientras que cuando las plantas presentaron sequía, la variedad Comapa superó numéricamente a todas las variedades en el peso seco total de biomasa. Esta superioridad fue del 14 % sobre Tacaná, 15 % para Jamapa y 27 % sobre la variedad 8025. Algunos estudios indican que, por lo general, los genotipos que producen mayor biomasa, tanto en riego como en sequía, presentan alto rendimiento de grano en ambas condiciones de humedad (Rosales-Serna *et al.*, 2000; Acosta-Díaz *et al.*, 2004).

Otros estudios relacionados con el efecto del déficit hídrico en frijol por Durigon *et al.* (2019) observaron que el mayor déficit de riego en la etapa de floración tuvo el efecto más pronunciado en la arquitectura de la planta. A tal grado que las plantas estresadas eran más cortas, las hojas eran más pequeñas y apuntaban hacia abajo, lo que indica que las plantas alteraron permanentemente su exposición a la luz solar. El efecto combinado del déficit de riego y la menor exposición a la luz conducen a vainas más cortas, menos biomasa de brotes y menor rendimiento de grano. Los modelos empíricos ajustados entre el déficit hídrico y la arquitectura de la planta se pueden incluir en los modelos de simulación arquitectónica para cuantificar la interceptación de la luz de la planta bajo estrés hídrico, lo que, a su vez, puede proporcionar modelos de cultivo que agreguen un segundo orden de efectos del estrés hídrico en la simulación del rendimiento del cultivo.

6.2.10. Longitud de raíz

Las plantas provenientes de todas las variedades de frijol con y sin déficit hídrico mostraron un comportamiento similar en la elongación de la raíz cuando la sequía se aplicó en la etapa reproductiva. Sin embargo, el estudio mostro que numéricamente cuando las plantas con y sin estrés hídrico la variedad Comapa superó en un 2 % a la variedad Tacaná, 3 % a Jamapa y con 6 % sobre 8025. Atrás (2001) señala que las plantas de frijol son sensibles al estrés hídrico, principalmente debido a su sistema de raíces superficiales. Estudios realizados por Condon *et al.* (2004) indica que en frijol hay tres procesos clave, entre otros, se han relacionado con la mejora de la resistencia a la sequía: (i) la adquisición de una mayor cantidad de agua por parte del sistema radicular del perfil del suelo para facilitar la transpiración, (ii) la adquisición de más carbono (biomasa) en relación con el agua transpirada, y (iii) una mayor movilización del carbono acumulado hacia el producto económico cosechable (Condon *et al.*, 2004). Investigaciones anteriores identificaron varios rasgos que contribuyen a mejorar la resistencia del frijol común a la sequía y estos incluyen la precocidad, el enraizamiento profundo y una mayor capacidad para dividir la materia seca en la producción de grano (Rao, 2014). Otros trabajos señalan que la sequía afecta el crecimiento de raíces y brotes, reduciendo la expansión celular, la conductancia hidráulica de estomas y raíces, la fotosíntesis y, en consecuencia, la acumulación de materia seca. Además, provoca aborto de flores, caída de vainas y reducción del peso de las semillas; también disminuye el número de días para que la planta alcance la madurez, la absorción de fósforo y la fijación de nitrógeno (Asfaw y Blair, 2012).

VII. CONCLUSIONES

- El efecto del estrés hídrico no afectó a las variedades Tacana y Jamapa, con excepción la variedad Comapa, que redujo la altura de planta en un 6 % y en un 11 % a la variedad 8025.
- El estrés hídrico afectó el desarrollo de hojas en la planta de frijol, al reducir en la variedad Jamapa y Comapa tres hojas y en Tacana dos hojas, con excepción de la variedad 8025.
- La intensidad de la sequía redujo en un 28 % el número de vainas por planta en la variedad de frijol negro 8028, 25 % para Tacana y 15 % para Jamapa y Comapa.
- El estrés hídrico afectó negativamente la formación de semillas por planta en un 17 %.
- La intensidad de la sequía redujo el número de semillas por planta en un 13 % para Jamapa, 17 % para Comapa y 23 % para 8025, con excepción de Tacaná que no sufrió cambios.
- El estrés hídrico no afectó la producción de materia seca de raíz en las variedades.
- La sequía redujo numéricamente el peso seco de raíz en un 6 % para Comapa, 14 % sobre Tacaná y 17 % para 8025.
- El estrés aplicado a todas las variedades aumentó numéricamente el peso seco de tallo y hojas en un 3 % y 1 % en vainas y biomasa total.
- Las plantas provenientes de todas las variedades de frijol con y sin déficit hídrico mostraron un comportamiento similar en la elongación de la raíz cuando la sequía se aplicó en la etapa reproductiva.
- Plantas con y sin estrés hídrico la variedad Comapa superó en un 2 % a la variedad Tacaná, 3 % a Jamapa y con 6 % sobre 8025.
- La variedad Jamapa fue la que sobresalió con mejor respuesta al estrés hídrico.

VIII. RECOMENDACIONES

- ❖ Incentivar y crear mecanismos para que se fomente mayor el interés por el estudiante y docentes sobre estudios de investigación en los cultivos nativos solo y/o en asociación y tecnologías sustentables.
- ❖ Divulgar el presente documento y/o una publicación informativa al respecto, al menos a la comunidad interna de la institución educativa.
- ❖ Motivar al estudiante principalmente en la capacidad de investigar, de elegir y seleccionar sus propias expectativas de indagación e investigación.
- ❖ Fortalecer la vinculación y difusión entre las instituciones educativas (IT Chiná) e instituciones de investigación (INIFAP) para coadyuvar en el aprendizaje de formación del estudiante.

IX. BIBLIOGRAFIA

Acosta-Gallegos, J.A., E. Acosta-Díaz, S. Padilla-Ramírez, E. López-Salinas, R.A. Salinas Pérez, N. Mayek Pérez y J.D. Kelly. 1998. Seed yield of dry bean cultivars under drought stress. Ann. Rep. Bean Improv. Coop. 41: 151-152.

Acosta-Díaz, E., Trejo, L.C., Ruiz, P.L.M., Padilla, R.J.S., Acosta, G.J.A. 2004. Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva Terra Latinoamericana, Vol. 22, Núm. 1: 49-58.

SAGARPA, 2017. Planeación agrícola nacional 2017-2030. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeaci_n_Agr cola_Na cional_2017-2030-_parte_uno.pdf

Gobierno de México, 2021. Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia. Gobierno de México: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.

Acosta, G.J.A., Jiménez, H.Y., Anaya, L.J.L., Montero, T.V., Guerrero, A.B.Z. 2018. Variedades de frijol y producción de semilla en Guanajuato. Folleto técnico Núm. 2. 48 p.



Luna, V.J. 2005. Guía para cultivar frijol de temporal en la zona media de San Luis Potosí. Folleto para productores Núm. 41. 24 p.

López, S.E., Tosquy, V.Ó.H., Jiménez, H.Y., Salinas, P.R.A., Villar, S.B. y Acosta G.J.A. (2012). Rendimiento y adaptación de la variedad de frijol 'Negro Comapa' en dos regiones de México. *Revista fitotecnía mexicana*, 35(4), 309-315.

Rosales, S. R.; Acosta, G. J. A.; Muruaga, M. J. S.; Hernández, C. G. E. y Pérez, H. P. 2004. Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. SAGARPA. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México, México. Libro técnico Núm. 6. 148 p

Lepe-Soltero, D.; Sánchez-García, B. M.; Jiménez-Hernández, Y.; Salinas Pérez, R. A.; García-Neria, M. A.; González de León, D.; Becerra-Leor, E. N.; Acosta-Gallegos, J. A. and Silva-Rosales, L. 2012. Presence of BCMV and BCMNV in five dry bean-producing states in Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15:313-321

Atta, BM; Mahmud, T.; Trethowan, RM. 2013. Relación entre la morfología de la raíz y el rendimiento de grano de trigo en el noroeste de NSW, Australia. *agosto J. Ciencia de cultivos*, 7 , 2108–2115.

Li, Y.; Vosotros, W.; Wang, M.; Yan, X. 2009. Cambio climático y sequía: una evaluación de riesgos de los impactos en el rendimiento de los cultivos. *Res. climática*, 39 , 31–46.

IPCC. Resumen para formuladores de políticas. En *Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*; Field, CB, Barros, VR, Dokken, DJ, Mach, KJ, Mastrandrea, MD, Bilir, TE, Chatterjee, M., Ebi, KL, Estrada, YO, Genova, RC, et al., Eds.; Prensa de la Universidad de Cambridge: Cambridge, Reino Unido, 2014; págs. 1–32

Dai, A.; Trenberth, KE; Qian, T. 2004. Un conjunto de datos globales del índice de gravedad de la sequía de Palmer para 1870–2002: relación con la humedad del suelo y los efectos del calentamiento de la superficie. *J. Hidrometeorol*, 5 , 1117–1130

Ericksen, PJ. 2008. Conceptualización de los sistemas alimentarios para la investigación del cambio ambiental global. *globo Reinar. Chang*, 18 , 234–245.



Araus J L, Slafer G A, Reynolds M P y Royo C (2002). Plant breeding and water relations in C3 cereals: What should we breed for? *Annals of Botany* 89: 925-940

Armando, U.J., Rosas, U.P., Ramírez, R.J.C., Ulloa, R.B.E. 2011a. El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. *Revista Fuente* Año 3 No. 8: 5 p.

Armando, U.J., Rosas, U.P., Ramírez, R.J.C., Ulloa, R.B.E. 2011b. El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. *Revista Fuente* Año 3 No. 8: 5 p. Diversos tamaños y colores del frijol. <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/1.pdf>

Alarcón, A. L. 2000. Tecnología para cultivos de alto rendimiento. *Novedades Agrícolas* S. A. Torres Pacheco (Murcia). 1ª edición. pp. 175-186.

De Herralde, T.F. 2000. Estudio integral de las respuestas ecofisiológicas al estrés hídrico: “La fisiología de las plantas” Departamento de Biología Vegetal de la Universidad de Barcelona. 165. P.

Fernández, F.; Geps, P. y López, M. 1986. Etapas de desarrollo en la planta de frijol. In: *Frijol: Investigación y Producción*. López, M.; Fernández, F. y Schoonhoven, A. van (eds). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. pp 61-78.

Beebe S, Skroch PW, Tohme J. (2000) Structure of genetic diversity among common bean landraces of middle american origin based on correspondence analysis of RAPD. *Crop Sci* 40:264. doi: 10.2135/cropsci2000.401264x

Broughton W, Hernandez G, Blair M (2003) Beans (*Phaseolus* spp.)—model food legumes. *Plant Soil* 252:55–128. doi:10.1023/A:1024146710611.

Benavides, M.A. (2002). Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas. Libro: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. ISBN: 968-844-042-6. 229 p.

Gepts, P., y Debouck, G. D. (1991). Origin, Domestication, and Evolution of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In A.vanSchoonhoven & O. Voysest (Eds.), *Common beans: Research for crop improvement* (pp. 7–43). Wallingford, UK.: CAB International and CIAT

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Informe anual 1983. Programa de frijol. 234 p.



Hernández-López, Víctor M., Vargas-Vázquez, Ma. Luisa P., Muruaga-Martínez, José S., Hernández-Delgado, Sanjuana, & Mayek-Pérez, Netzahualcóyotl. (2013). Origen, domesticación y diversificación del frijol común: Avances y perspectivas. *Revista fitotecnia mexicana*, 36(2), 95-104.

Miranda-Colín S (1967) Origen de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol común). *Agrociencia* 1:99-104.

Bukasov, S.M. (1931). The cultivated plants of México, Guatemala and Colombia. *Bull. Appl. Bot. Gen. Pl. Breed.*, Suppl. 47. 1-553.

Linnaeus, (1753). *Sp. Pl.* p. 723.

Vavilov, N. I. (1949-1950). The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. *The Chronica Botanica Co.*, Waltham, Mass. U.S.A. 13: 13-54

Kaplan, L. (1965). Archeology and domestication in American *Phaseolus* (beans). *Springer Link*, 19(4), 358-368.

Kaplan, L., y Lynch, T.F. (1973). Early cultivated beans (*Phaseolus vulgaris*) from an intermontane Peruvian valley. *Science*, 179(2068), 76-77.

Miranda, C.S. (1967). Origen de *Phaseolus vulgaris* L. (Frijol común). *Agronomía Tropical*, 1(2), 99-109.

Singh, S.P., y Gutiérrez, J. A. (1984). Geographical distribution of the DL1 and DL2 genes, and causing hybrid dwarfism in *Phaseolus vulgaris* L., their association with seed size, and their significance to breeding. *Euphytica*. 33(2), 337-345.

Paredes, M. and Gepts, P. 1995. Extensive introgression of Middle American germplasm into Chilean common bean. *Gen. Res. and Crop Evo.* 42 :29-41

Vargas M L P, J S Muruaga, J A Acosta, R Navarrete, P Pérez, G Esquivel, M B G Irizar, J M Hernández (2006) Colección Núcleo de *Phaseolus vulgaris* L. del INIFAP. Catálogo de Acciones de la Forma Domesticada. Libro Técnico no. 10. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. Chapingo, México. 461 p.

Lépiz I., R (ed). 2007. *Avances de investigación 2003-2006. Red Frijol*. Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). Las Agujas, Municipio de Zapopan, Jalisco, México. 97 pp.



SNICS, 2016. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas 12 de agosto de 2016 <https://www.gob.mx/snics/articulos/diversidad-de-frijol-enmexico#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20centro%20de%20diversidad,la%20Red%20frijol%20del%20SNICS>.

CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria), 2020. Mercado del Frijol, Situación y Prospectiva. 20 p. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/53Mercado%20del%20frijol.pdf>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2019. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/448930/Reporte de Aptitud agroclimtica de México del frijol PV 2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/448930/Reporte_de_Aptitud_agroclimtica_de_México_del_frijol_PV_2019.pdf)

Ladizinsky G (1998) Plant evolution under domestication. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 256 p.

Papa R, Gepts P L. (2003) Asymmetry of gene flow and differential geographical structure of molecular diversity in wild and domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) from Mesoamerica. *Theor. Appl. Genet.* 106:239-250.

Papa R, L Nanni, D Sicard, D Rau, G Attene (2006) The evolution of genetic diversity in *Phaseolus vulgaris* L. In: *Darwin's Harvest: New Approaches to the Origins, Evolution, and Conservation of Crops.* J J Motley, N Zerega, H Cross (eds). Columbia University Press. New York. pp:121-142

Gepts P (1999) What can molecular markers tell us about the process of domestication in common bean? In: *The Origins of Agriculture and the Domestication of Crop Plants.* A Damania, J Valkoun, G Willcox, C O Qualset (eds). International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Aleppo, Syria. pp:198-209.

Miranda-Colín S (1967) Origen de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol común). *Agrociencia* 1:99-104

Gentry H S (1969) Origin of the common bean, *Phaseolus vulgaris*. *Econ. Bot.* 23:55-69

Kwak M, J A Kami, P Gepts (2009) The putative Mesoamerican domestication center of *Phaseolus vulgaris* is located in the LermaSantiago Basin of Mexico. *Crop Sci.* 49:554-563.



Mensack M M, V K Fitzgerald, E P Ryan, M R Lewis, H J Thompson, M A Brick (2010) Evaluation of diversity among common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from two centers of domestication using 'omics' technologies. BMC Genomics 11:686.

Bitocchi E, E Bellucci, A Giardini, D Rau, M Rodriguez, E Biagetti, R Santilocchi, P S Zeuli, T Gioia, G Logozzo, G Attene, L Nanni, R Papa (2013) Molecular analysis of the parallel domestication of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) in Mesoamerica and the Andes. New Phytol. 197:300-313.

Brick M, Burgener P (2007) Origin and World Production. Colorado Beans News 20: 7.

MA, Y. y F.A. BLISS. "Seed Proteins of Common Bean", Crop Sci

Bennink, M.R. "Health benefits associated with consumption of dry beans", Annu Rep Bean Improv Coop, 2010, 53, pp. 2-3.

Becerra-Velásquez, V.L. y P. Gepts. 1994. "RFLP diversity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)", Genome, 37, pp. 256-263.

Koinange EMK, Singh SP, Gepts P (1996) Genetic control of the domestication syndrome in common bean. Crop Sci 36: 1037. doi: 10.2135/cropsci1996.0011183X003600040037x

Pastor, MA; Schwartz, YH. 1994. Problemas de producción del frijol en los trópicos. 2 ed. CIAT, Colombia. 734 p.

Bellón, M.R. et al. "Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas", en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. México: CONABIO, 2009, pp. 355-382

Sangermán-Jarquín, D. M.; Acosta-Gallegos, J. A.; Schwenstesius, R. R.; Damián, H. M. A. y Larqué, S. B. S. 2010. Consideraciones e importancia social en torno al cultivo del frijol en el centro de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 1(3), 363-380.

Acosta, G.J.A., 2021. Simposio Nacional de Frijol para México, hacia la autosuficiencia y sustentabilidad de la producción y el consumo. <https://www.gob.mx/inifap/es/articulos/simposio-nacional-de-frijol-para-mexico-hacia-la-autosuficiencia-y-sustentabilidad-de-la-produccion-y-el-consumo?idiom=es#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20el%20cultivo%20de,1.1%20millones%20de%20toneladas%20anualmente>.

Delgado-Salinas, Alfonso; Bibler, Ryan; Lavín, Matt (2006). *Filogenia del género <i>Phaseolus</i> (Leguminosae): una diversificación reciente en un paisaje antiguo*. *Botánica sistemática*, 31(4), 779–791. doi:10.1600/036364406779695960

Martínez-Castillo J., D. Zizumbo-Villarreal, H. Perales-Rivera and P. Colunga-García-Marín (2004) Intraspecific diversity and morpho-phenological variation in *Phaseolus lunatus* L. from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Economic Botany* 58:354-380.

Zlatev, Z.; Berova, M. y Vassilev, A. 2003. Use of physiological parameters as stress indicators. *Journal of Experimental Protection and Ecology* 4(4):841-849.

Stepanova, A. y J. Alonso. 2005. Ethylene signalling and response pathway: a unique signaling cascade with a multiple of inputs and outputs. *Physiol. Plant.* 123, 195-206.

Verslues PE, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, Zhu J, Zhu JK. 2006. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *Plant J.* 45(4):523-39. doi: 10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x.

Tadeo, F.R. 2000. Fisiología de las plantas y el estrés. En: *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. (eds. Azcón, B.J. y Talón, M.) Ed. McGraw-Will Interamericana. Ediciones de la Universidad de Barcelona, Madrid-Barcelona. 481-490 p.

Sánchez, D.M. y Acuirreola, J. 2000. Capítulo 2. El agua en la planta. En: *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. (eds. Azcón, B.J. y Talón, M.) Ed. McGraw-Will Interamericana. Ediciones de la Universidad de Barcelona, Madrid-Barcelona. 17-82 p.

Hsiao, T.C. y Bradford, K.J. 1983. *Physiological Consequences of Cellular Water Deficits. Limitations to efficient water in crop production* (H. M. Taylor, W.R. Jordan y T.R. Sinclair, eds.) Published by ASA, CSSA and SSA. Madison. Wisconsin. USA. 227-265

Turner, N.C. y Cramer, P.J. 1980. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. John Wiley y Sons, U.S.A.

Aspinall, D. y Paleg, LG (1981) Acumulación de prolina: aspectos fisiológicos, en: Paleg, LG y Aspinall, D. Eds., *Fisiología y bioquímica de la resistencia a la sequía en las plantas*, Academic Press, Sydney, 205-241.



Hanson, A. D. and W. D. Hitz. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Ann. Rev. Pl. Physiol.* 33: 163-203.

Blum, W., 2005. Soils and climate change. *Journal of Soils and Sediments*, 5(2), pp.67–68.

Bray, E.A. 2002. Absciscic acid regulation of gene expression during water-deficit stress in the era of the Arabidopsis genome. *Plant Cell Environ.* 25, 153-161.

Flezas, J. (2002). *Inhibición por sequía de la fotosíntesis en plantas C3: revisión de las limitaciones estomáticas y no estomáticas.*, 89(2), 183–189. doi:10.1093/aob/mcf027

Chapin, F. S. III, E.-D. Schulze, and H. A. Mooney. 1990. The ecology and economics of storage in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 21: 423-447.

Nobel, PS 1991. Fisiología vegetal fisicoquímica y ambiental. Prensa académica, Inc., San Diego, CA. 635 págs.

Martínez, T.T., Vargas, A.T., Muñoz, O.J., López, V.T. 2002. Respuesta al déficit hídrico. Consumo de agua y crecimiento en plantas de diferentes poblaciones. *Agrociencia.* 36: 365-372.

Rao I M (2001) Role of physiology in improving crop adaptation to abiotic stresses in the tropics: The case of common bean and tropical forages. In: M Pessarakli (ed). *Handbook of Plant and Crop Physiology*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA. pp: 583- 613

Morgan JM (1992) Componentes osmóticos y propiedades asociadas con diferencias genotípicas en la osmorregulación en trigo. *Biología Vegetal Funcional* 19 , 67-76.

Shinozaki K, K Yamaguchi-Shinozaki 2007 Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *J Exp Bot* 58:221–227.

Nakashima, K, Yamaguchi- Shinozaki K , Shinozaki K. 2014. La red reguladora transcripcional en la respuesta a la sequía y su diafonía en las respuestas al estrés abiótico, incluidas la sequía, el frío y el calor . *Ciencia de la planta frontal.* 5: 170 . doi: 10.3389/fpls.2014.00170 .

Chen, H., and Jiang, J.G. 2009. Osmotic responses of *Dunaliella* to the changes of salinity. *J. Cell. Physiol.* 219(2): 251–258. doi:10.1002/jcp.21715. PMID:19202552



Zhang, W.H., Walker, N.A., Patrick, J.W., and Tyerman, S.D. 2004. Pulsing Cl-channels in coat cells of developing bean seeds linked to hypo-osmotic turgor regulation. J. Exp. Bot. 55(399): 993–1001. doi:10.1093/jxb/erh120. PMID: 15047765.

Valliyodan B , Nguyen HT. 2006. Comprender las redes reguladoras y la ingeniería para mejorar la tolerancia a la sequía en las plantas . Curr Opin Plant Biol. 9 (2): 189 – 195 .

Liang, X.; Zhang, L.; Natarajan, S.K.; Becker, D.F. 2013. Proline mechanisms of stress survival. Antioxid. Redox. Signal. 19, 998–1011.

Szabados, L. y Saviouré, A. (2010). *Proline: a multifunctional amino acid.* , 15(2), 0–97. doi:10.1016/j.tplants.2009.11.009

Verslues, P.E.; Sharma, S. 2010. Proline metabolism and its implications for plant-environment interaction. Arab. Book, 8, e0140

Pedrosa, A., Martins, C., Gonçalves, L. y Costa, M. (2015). Late Embryogenesis Abundant (LEA) Constitutes a Large and Diverse Family of Proteins Involved in Development and Abiotic Stress Responses in Sweet Orange (*Citrus sinensis* L. Osb.). PloS one. 10. e0145785. 10.1371/journal.pone.0145785.

Duan J, Cai W (2012) OsLEA3–2, an abiotic stress induced gene of rice plays a key role in salt and drought tolerance. PLoS One 7(9): e45117

Sánchez, E; Ávila-Quezada, G; Gardea, Aa; Ruiz, Jm; Romero, L. 2007. Biosynthesis of proline in fruits of green bean plants: deficiency *versus* toxicity of nitrogen. Phytom; Buenos Aires Tomo 76: 143-152.

Smeekens, S. 1998. Sugar regulation of gene expression in plant Plant Biol. 1. Pp. 203-204.

Medrano, H. Flexas, J. 2002. Capítulo 1. Respuesta de las plantas al estrés hídrico. En: Fundamentos de Fisiología Vegetal 377p. (eds. J. Azcón-Bieto y M.Talón). Ed. McGraw-Hill Interamericana-Ediciones de la Universidad de Barcelona, Madrid-Barcelona. España.

Carrasco, S.J. 2007. Respuesta al estrés hídrico en plantas mediterráneas Perspectiva frente al cambio climático. Facultad de Farmacia Universidad Complutense. 20 P.
(Modificado.http://www.coursenotes.org/campbells_biology_8th_edition/chapter_36_resource_acquisition_and_transport_in_vascular_plants (18/01/2017))



Acosta Gallegos, J.A., y Kohashi Shibata, J. (1989). Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Field Crop Research*, 20(2).

Acosta Díaz, E., Trejo López, C., Ruiz Posadas, L. del M., Padilla Ramírez, J. S., y Acosta Gallegos, J. A. (2004). Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva. *Terra Latinoamericana*, 22(1).

Azcón-Bieto, J. y Talón M. 2008. *Fundamentos de fisiología vegetal* 2ªEd. McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U., Madrid.

Brestic, M., Zivcak, M. 2013. PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in crop plant: protocols and applications. In: Rout GR, Das, AB. (eds). *Molecular Stress Physiology of Plants* pp. 87-131.

Chaves, M.M., Maroco, J.P., Pereira, J.S. 2003. Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.* 30: 239-264.

Rangel Fajardo, M.A. 2009. Anatomía y tolerancia a la desecación de las semillas de cacao. Tesis Doctoral, Colegio de postgraduados Montecillo, México.

Nilsen, E.T. y D.M. Orcutt. 1996. *Physiology of plants under stress. Abiotic factors.* John Wiley and Sons, New York, NY.

Shao, H.B., L.Y. Chu, C.A. Jaleel y C.X. Zhao. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331, 215-225.

Taiz, L. and E. Zeiger. 2002. *Plant physiology.* Sinauer Associates. Sunderland, MA, USA.

Zargar, S.M., Gupta, N., Nazir, M., Mahajan, R., Malik, F.A., Sofi, N.R., Shikari, A.B., Salgotra, R.K. 2017. Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant Gene* 89

Wang, J., Bughrara, S. 2007. Monitoring of gene expression profiles and identification of candidate genes involved in drought responses in *Festuca mairei*. *Mol. Genet. Genomics* 277: 571-587.

Neumann, P.M. 2008. Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Ann. Bot.* 101: 901-907.



Valliyodan, B., Nguyen, H.T. 2006. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 9: 189–195.

Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., 2007. Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *J. Exp. Bot.* 58: 221–227.

Lawson, T., Blatt, M.R., 2014. Stomatal Size, Speed, and Responsiveness Impact on Photosynthesis and Water Use Efficiency. *Plant Physiol.* 164: 1556–1570.

Brestic, M., Zivcak, M. 2013. PSII fluorescence techniques for measurement of drought and high temperature stress signal in crop plant: protocols and applications. In: Rout GR, Das, AB. (eds). *Molecular Stress Physiology of Plants* pp. 87-131.

Nobel, P. S. 2005. *Physicochemical and environmental plant physiology*. 3rd ed. Elsevier Academic press. 567 pp.

Kurasová, Irena, Cajanek, M., Kalina, Jiří, Urban, Otmar, Špunda, Vladimír. (2002). Characterization of acclimation of *Hordeum vulgare* to high irradiation based on different responses of photosynthetic activity and pigment composition. *Photosynthesis Research*. 72. 71-83. 10.1023/A:1016018900535.

Squeo, F., Ehleringer, J.R. 2004. Isótopos estables: una herramienta común para la ecofisiología vegetal y animal. En *Fisiol. Ecológica en Plantas Mec. y Respuestas a Estrés en los Ecosistemas*. Ed. H. Marino Cabrera. Pp. 59–80.

Moghaddam, A., Raza, A., Vollmann, J., Ardakani, M.R., Wanek, W., Gollner, G., Friedel, J.K. 2013. Carbon isotope discrimination and water use efficiency relationships of 97 alfalfa genotypes under irrigated and rain-fed organic farming. *Eur. J. Agron.* 50: 82– 89

Lawlor, David. (2002). Limitation to Photosynthesis in Water-stressed Leaves: Stomata vs. Metabolism and the Role of ATP. *Annals of botany*. 89 Spec No. 871-85. 10.1093/aob/mcf110.

Sánchez-Díaz, M.; Aguirreolea, J. 2008. Transpiración y control estomático. En: Azcón-Bieto, J.; Talón, M. (Eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana de España (Madrid). p.41-56.

Iker, Aranjuelo, Molero, Gemma, Erice, Gorka, Avice, Jean-Christophe, Nogués, Salvador. (2011). Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Journal of experimental botany*. 62. 111-23. 10.1093/jxb/erq249.

Bartels, Dorothea y Salamini, Francesco. (2002). Desiccation Tolerance in the Resurrection Plant *Craterostigma plantagineum*. A Contribution to the Study of Drought Tolerance at the Molecular Level. *Plant physiology*. 127. 1346-53. 10.1104/pp.010765.

Pattanagual P, Madore MA (1999) Water deficit effects on raffinose family oligosaccharide metabolism in *Coleus*. *Plant Physiol*. 121: 987-993.

Brevedan RE, Egli DB (2003) Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Sci*. 43: 2083-2088.

Boicet, T: 2010. Estrés hídrico y la distribución de características vegetativas y reproductivas en los genotipos de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L). En: II Simposio de Ecofisiología Vegetal. Libro Resumen XVII Congreso Científico Internacional del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, p. 145, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

Alfonso, E. 1987. El frijol, pp. 136-138, Departamento de Ediciones del ISCAH. La Habana, Cuba.

Nielsen DC, Nelson NO (1998) Black bean sensitivity to water stress at various growth stages. *Crop Sc*. 38: 422-427.

Rosas, J. (2003). El cultivo del frijol común en América Tropical.

Krämer, R.A. (1995). Subsidiarity and Water Policies. Conference on Institutional Dimensions of Water Resources Management. Lisbon 10-12 July. Doc. 16, 74 p.

Muñoz, C., Terán, H., Allen, R. G., Wright, J. L., Westermann, D. T., y Singh, S. P. (2006). Selection for Drought Resistance in Dry Bean Landraces and Cultivars. *Crop Science*, 46(5).

Aguilar Benítez, G., Peña Valdivia, C. B., García Nava, R. J., Ramírez Vallejo, P., Benedicto Valdés, S., y Molina Galán, J. D. (2012). Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia*, 46(1).

Frahm, M., Rosas, J. C., Mayek, N., López, E., Acosta, J. A., y Kelly, J. D. (2003). Resistencia a sequía terminal en frijol negro tropical. *Agron. Mesoam*, 14(2)

Terán, H. & Singh, S. P. (2002). Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean. *Crop Science*, 42(1).

Acosta Gallegos, J.A., y Kohashi Shibata, J. (1989). Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Field Crop Research*, 20(2).

Osuna Ceja, E. S., Reyes Murov, L., Padilla Ramírez, J. S., Rosales Serna, R., Martínez Gamiño, M. A., Acosta Gallegos, J. A., y Figueroa Sandoval, B. (2013). Rendimiento de genotipos de frijol con diferentes métodos de siembra y riego-sequía en Aguascalientes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(8).

N.O. Miranda y N.C. Belmar. 1977. "Déficit hídrico y frecuencia de riego en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)", *Agricultura Técnica*, 37(3): 111-117

A. Núñez, J. Ritchie y A. Smucker. 1998. "El efecto de sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común", *Agronomía Mesoamericana*, 9(2): 1-8.

A. Peña y R. Muñoz. 1988. "Respuesta de tres especies cultivadas a condiciones deficientes de humedad edáfica", *Agronomía*, 74: 231-243.

Babalola, 1980. "Water relations of three cowpea cultivar *Vigna unguiculata* L.", *Plant and Soil*, 56(1):5969.

J. Elston and A.H. Bunting. 1980. "Water relations of legume crops", in: H.J. Summerfield and A.H. Bunting (eds.), *Advances in legume Science*. Royal Botanic Gardens, UK, pp. 37-42.

S. Kohashi, T. Galván, E. García, J. Yáñez, V. Martínez y P. Ruíz. 2002. "Estrés hídrico y su efecto en el crecimiento de los fitómeros del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)", *Agric. Téc. Méx.*, 28(1): 65-75

G. Guzmán. 2010. "Evaluación bajo condiciones controladas de estrés hídrico las diferencias fenotípicas del crecimiento y desarrollo de raíces de genotipos promisorios de frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.)", *Centro Experimental Campos Azules. Instituto de Nicaragua de Tecnología Agropecuaria*.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2019. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/camp/territorio/clima.aspx?tema=me&e=04>

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20211231.pdf>



<http://www.ccpy.gob.mx/agenda-campeche/escenarios.php>

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20210831.pdf>

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20211115.pdf>

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20211130.pdf>

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20211215.pdf>

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20M%C3%A9xico/Seguimiento%20de%20Sequ%C3%ADa/MSM20211231.pdf>