

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
SEDE VILLA CORZO

**EFFECTO DEL ESTRÉS HIDRÍCO EN VARIEDADES DE FRIJOL
(*Phaseolus vulgaris L.*) EN CONDICIONES SEMICONTROLADAS**

TESIS PROFESIONAL

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
TÍTULO DE
INGENIERO AGROFORESTAL**



PRESENTA
AMAIRANI BERENICE PÉREZ OZUNA

DIRECTOR DE TESIS
DR. LUIS ALFREDO RODRÍGUEZ LARRAMENDI
CO-DIRECTOR
DR. VICENTE PÉREZ MADRIGAL

Villa Corzo, Chiapas, septiembre de 2025



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA GENERAL

DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Villacorzo, Chiapas.
12 de Noviembre de 2025

C. Amairani Berenice Pérez Ozuna

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería Agroforestal

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

"Efecto Del Estrés Hídrico En Variedades De Frijol (Phaseolus Vulgaris L.) En Condiciones

Semicontroladas

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Miguel Ángel Salas Marina

Dr. Vicente Pérez Madrigal

Dr. Luis Alfredo Rodríguez Laramendi

Firmas:

Ccp. Expediente

AGRADECIMIENTO

Primero que nada, agradezco a Dios por darme la vida y permitirme cumplir una meta más de trabajar y culminar este gran proyecto.

A mis padres, Ariel Pérez Gómez y Edali Ozuna Ruíz por siempre estar presentes en cada momento, brindándome su apoyo, amor y paciencia, motivándome cada día a esforzarme para poder cumplir mis metas y sobre todo, que a pesar de las situaciones difíciles y las dificultades, ellos han estado presentes para ayudarme a salir adelante.

A mis hermanos Javier, Anahomi y Rosa Isabel por su comprensión, apoyo y amor que me han brindado en este capítulo de mi vida, agradezco mucho los consejos, su paciencia y sobre todo los ánimos que me brindaron durante este nuevo camino que estoy por recorrer.

A mi abuelo, Rosauro Ozuna López que aunque ya no está físicamente conmigo, sé que me acompaña en cada paso que doy, gracias por haber creído en mí cuando nadie más lo hizo, por impulsarme con tu ejemplo y por sembrar en mí el deseo de superarme. Este trabajo es un homenaje a tu memoria y a todo lo que representas en mi vida.

A mis mejores amigos, Arleth, Raúl por sus palabras de aliento, quienes me ayudaron siempre dándome algún consejo en esos momentos en los que sentía no poder continuar y quería dejar todo a la deriva. Y por siempre preguntarme ¿Y la tesis para cuando?.

A Rudijer una persona especial quien marcó mi vida de una manera que el tiempo no ha podido borrar y aunque ya no forma parte de mi vida, dejó una huella profunda e imborrable en mi camino personal. Su recuerdo, su apoyo y las enseñanzas compartidas siguen presentes como fuente de inspiración en cada logro alcanzado. Gracias por haber sido parte de esta gran historia por tu apoyo, tus palabras, tu amor, comprensión, paciencia y por todo lo que me enseñaste sin saberlo.

Extiendo igualmente esta dedicatoria a su familia quienes se convirtieron en una segunda familia para mí. Agradezco profundamente su cariño, comprensión y respaldo incluso cuando la vida tomó caminos diferentes. Su apoyo y afecto me acompañaron en los momentos más importantes de este camino, y por ello siempre ocuparán un lugar especial en mi gratitud y en mi memoria. A pesar del paso del tiempo y de las circunstancias, su respaldo y estima han permanecido, y por ello les guardo un profundo agradecimiento.

A mi director de tesis, Doctor Luis Alfredo Rodríguez Larramendi por haber confiado en mí y darme la oportunidad de trabajar con el este proyecto y sobre todo por siempre darme su apoyo, paciencia y brindarme de sus conocimientos durante esta investigación. Por ser un excelente ser humano y sobre todo un excelente profesor que motiva y guía a sus alumnos para alcanzar sus metas.

Al Doctor Vicente Pérez Madrigal, por dedicarme de su tiempo y brindarme sus conocimientos durante el desarrollo de este proyecto de tesis, agradezco su paciencia y el motivarme a seguir aprendiendo.

Al Doctor Miguel Ángel Salas Marina por creer en mi y brindarme parte de sus conocimientos, darme su apoyo y por haber confiado en mí para poder realizar este gran proyecto.

A la Bióloga Liliana Marisol Patiño López por ser una gran persona y amiga, por enseñarme que en la vida puedes lograr todo lo que te propongas con la fe de Dios, por creer en mi, darme su apoyo, paciencia y brindarme de sus conocimientos durante mi servicio y prácticas profesionales.

A la Licenciada Karol Sarmiento Valdenegro por ser una gran amiga y persona por dedicarme su tiempo, por apoyarme en cada momento y por ser una gran guía durante mis prácticas y por haberme brindado su apoyo en todo este tiempo.

Este logro representa también una parte de lo que cada uno de ellos sembró en mí.

INDICE

<u>Resumen</u>	5
<u>INTRODUCCIÓN</u>	6
<u>Problema de investigación</u>	8
<u>Hipótesis</u>	9
<u>OBJETIVOS</u>	9
<u>Objetivo general</u>	9
<u>Objetivos específicos</u>	9
<u>MARCO TEORICO</u>	9
<u>3.1 Origen y distribución del frijol</u>	9
<u>3.2 Importancia económica del cultivo del frijol</u>	10
<u>3.3 La producción de frijol en México</u>	11
<u>3.5 Concepto de estrés</u>	13
<u>3.5.1 Tipos de estrés</u>	13
<u>3.5.2 Concepto de estrés hídrico</u>	15
<u>3.5.4 Manifestación del estrés hídrico en las plantas</u>	15
<u>3.5.5 Clasificación de las plantas frente a la disponibilidad de agua</u>	16
<u>3.5.6 Efecto del estrés hídrico en las plantas</u>	17
<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	22
<u>4.1 Localización</u>	22
<u>4.2 Tratamientos</u>	22

<u>4.3 Variables medidas</u>	22
<u>4.3.1 Crecimiento</u>	22
<u>4.3.2 Índices de crecimiento</u>	23
<u>4.3.3 Fluorescencia de la clorofila y contenido de clorofilas a + b</u>	23
<u>4.3.4 Indicadores del régimen hídrico de la planta</u>	24
<u>4.4 Análisis estadísticos</u>	24
<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	25
<u>CONCLUSIONES</u>	29
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	30

RESUMEN

El frijol es una de las leguminosas más importante para consumo humano por su contenido proteico, vitaminas y minerales. En los últimos años su producción está en riesgo debido a los factores de estrés bióticos y abióticos que afectan el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del estrés hídrico en el crecimiento, acumulación de biomasa y eficiencia fotosintética en dos variedades de frijol (Verdín y Sangre Maya). El experimento se realizó en condiciones semicontroladas, utilizando un diseño completamente al azar con un tratamiento bajo estrés hídrico y un control. Las plantas sometidas a estrés hídrico presentaron una reducción significativa en su crecimiento en comparación con el grupo control. La disponibilidad de agua durante el ciclo vegetativo favorece el crecimiento óptimo en términos de características morfológicas y fisiológicas. El estrés hídrico puede tener un impacto significativo en el crecimiento vegetativo, producción y calidad del cultivo del frijol. Estos hallazgos son resaltan la importancia del agua en la producción de frijol y permiten desarrollar estrategias de manejo del agua en regiones con poca disponibilidad de agua para la agricultura.

Palabras clave: Crecimiento, Fluorescencia de la clorofila, Contenido Relativo de Agua

ABSTRACT

Beans are one of the most important legumes for human consumption due to their protein, vitamin, and mineral content. In recent years, their production has been at risk due to biotic and abiotic stress factors that affect crop growth, development, and yield. The objective of this study was to evaluate the effect of water stress on growth, biomass accumulation, and photosynthetic efficiency in two bean varieties (Verdín and Sangre Maya). The experiment was conducted under semi-controlled conditions, using a completely randomized design with a water stress treatment and a control. Plants subjected to water stress showed a significant reduction in growth compared to the control group. Water availability during the vegetative cycle promotes optimal growth in terms of morphological and physiological characteristics. Water stress can have a significant impact on vegetative growth, production, and quality of bean crops. These findings highlight the importance of water in bean production and allow for the development of water management strategies in regions with limited water availability for agriculture.

Key words: Growth, Chlorophyll fluorescence, Relative water content.

1. INTRODUCCIÓN

El frijol común es considerado una de las principales fuentes de alimento en América Latina y el Caribe por su alto contenido de proteína y lípidos (Amugune *et al.*, 2011). El frijol es un cultivo fundamental en México, ocupando el segundo lugar en términos de superficie sembrada, más de un millón de hectáreas, localizadas principalmente en el altiplano semiárido, que oscila entre los 1,800 y 2,200 msnm, solo superado por el maíz (Huerta-Lara *et al.*, 2021). Esta posición destaca su relevancia económica y cultural en la dieta de sus habitantes. Sin embargo, los bajos rendimientos en los últimos años, han llevado a un aumento de las importaciones del cultivo, para satisfacer la creciente demanda interna (Pérez-Herrera *et al.*, 2002).

La siembra de frijol en los últimos años, refleja una marcada diferencia entre las áreas cultivadas bajo riego y de temporal. El estado de Sinaloa destaca como líder en superficie sembrada bajo riego, concentrando una parte significativa de la producción nacional. En contraste, estados como Zacatecas y Durango lideran la siembra en condiciones de temporal. Las principales entidades federativas productoras de frijol de la región tropical húmeda del sureste de México son Chiapas y Veracruz. De manera particular, en el estado de Chiapas se cultivaron 116,575 ha, que produjeron 61 412 t, 85% de frijol de grano negro, 10% de grano rojo y el resto de otros tipos de frijol (SAGARPA, 2015). El rendimiento en la región aún está por debajo de la media nacional, lo cual es el resultado de la incidencia de diversos factores adversos, entre los que destacan: errática distribución de las lluvias con sequía en siembras de temporal (secano) y sequía terminal al final del ciclo, cuando el cultivo se establece bajo condiciones de humedad residual (López *et al.*, 2002).

Los factores de estrés son causas de pérdidas económicas en los cultivos, como el frijol. El estrés vegetal se refiere a las condiciones adversas o factores que afectan negativamente el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas, y puede ser causado por una variedad de factores abióticos y bióticos. Dentro de los principales factores abióticos que afectan al cultivo destacan las condiciones climáticas extremas como sequías, inundaciones,

temperaturas extremas, salinidad del suelo, radiación ultravioleta y contaminantes ambientales (Pedroza *et al.*, 2013).

Está descrito que el frijol es un cultivo susceptible tanto al exceso de humedad como a al déficit hídrico durante su ciclo de desarrollo. Una parte significativa de la producción proviene de regiones con condiciones de temporal, donde la disponibilidad limitada de agua constituye un factor restrictivo que impacta considerablemente la productividad de esta leguminosa. El 60% de la producción mundial de frijol se obtiene bajo condiciones de déficit de hídrico (Acosta *et al.*, 2011). La sequía es el factor más importante que limita el rendimiento de frijol en áreas de temporal, la cual se traduce en la planta como déficit, inhibición y subseciente detención del crecimiento (Galvan-Tovar *et al.*, 2003).

El estudio realizado por Boicet (2010) ofrece valiosas percepciones sobre los efectos del déficit hídrico en el rendimiento y el crecimiento de los cultivos, se evidenció que los indicadores de producción, como la cantidad de vainas y semillas, así como los rendimientos totales, mostraron diferencias estadísticamente significativas. Específicamente, cuando los cultivos no experimentaron déficit hídrico durante su ciclo vegetativo, se registraron valores superiores en estas métricas, señalando la clara influencia positiva de la disponibilidad adecuada de agua en el desarrollo y la productividad de las plantas.

A partir de estudios realizados por López (2008; 2011) sobre el efecto de la sequía en frijol negro, se identificaron algunas líneas avanzadas y variedades que presentaron buena adaptación a condiciones de deficiencia de humedad. Así se generó la variedad Verdín, la cual es tolerante a la sequía terminal, y tiene alto potencial de rendimiento y amplia adaptación en las diferentes áreas en que se produce frijol en los estados de Veracruz y Chiapas (Tosquy *et al.*, 2016). Por otra parte, existen estudios sobre la respuesta en rendimiento, resistencia a enfermedades y adaptación de variedades de frijol rojo en suelos ácidos de baja fertilidad. Un ejemplo de ello es la línea de la cual se generó la variedad Sangre Maya que se introdujo en México en 2009 y al estado de Chiapas en 2010, con el código RCB 592 (Villar *et al.*, 2016).

Los resultados de la investigación ofrece información valiosa para los productores sobre las respuestas fisiológicas de las variedades sangre maya y verdín cultivadas en la región Frailesca, bajo estrés hídrico.

Problema de investigación

El cambio climático refleja recurrentes sequías, largos períodos sin precipitaciones, que causan afectaciones en el crecimiento y el rendimiento de las plantas cultivadas en la región Frailesca. En el caso particular del frijol, la sequía provoca pérdidas económicas en las familias de productores dedicados a la producción agrícola

Hipótesis

La escasez de agua se manifiesta en la reducción del crecimiento vegetativo del frijol, así como en el régimen hídrico de las plantas y su eficiencia fotosintética.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto fisiológico del estrés hídrico en el crecimiento y desarrollo de variedades de frijol en condiciones semi-controladas

2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto fisiológico del estrés hídrico en el crecimiento y acumulación de biomasa en plantas de frijol en condiciones semi controladas.
2. Determinar el efecto fisiológico del estrés hídrico en el contenido hídrico foliar y la eficiencia fotosintética en plantas de frijol en condiciones semi controladas.

3. MARCO TEORICO

3.1 Origen y distribución del frijol

El frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) es una planta de la familia leguminosas (*Fabaceae*), originaria de las regiones de Mesoamérica y los Andes en América del Sur, donde ha sido cultivado y consumido desde tiempos precolombinos, concretamente en México, desde Jalisco hasta Oaxaca, y de ahí la especie migró a Sudamérica. 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. Es una planta de porte bajo, hojas trifoliadas y frutos en forma de vainas (Figura 1). Los granos varían su morfología y color en dependencia de la variedad.



Figura 1. Planta de frijol con hojas trifoliada y frutos en forma de vainas.

Además (Kaplan, 1965) estableció que *P. vulgaris L.* se domesticó en el Valle de Tehuacán, Puebla, México hace aproximadamente 7000 años, probablemente en asociación con el maíz. Los estudios genéticos han demostrado que su diversidad genética es mayor en esta región, lo que respalda la teoría de que es su lugar de origen (Bitocchi *et al.*, 2012). Por otra parte, la domesticación en los Andes, ocurrió de manera independiente, produjo una diversidad distinta de variedades de frijol. Estas diferencias genéticas entre las poblaciones de frijol mesoamericanas y andinas reflejan adaptaciones específicas a los ambientes y prácticas agrícolas locales (Freytag y Debouck, 2002).

Sin embargo en las cuevas ‘El Guitarreo’ y ‘El Callejón’ en Hualyas, Perú se recuperaron restos de *P. vulgaris*, con características similares a las formas actuales cultivadas de frijol. Esto indica que los restos más antiguos de *P. vulgaris* se encontraron en el Continente Americano, en dos áreas geográficas lejanas: Mesoamérica y los Andes (Kaplan, 1965;

Kaplan *et al.*, 1973). Es decir que Perú pudo ser uno de los primeros centros de domesticación del frijol. El análisis de los restos de plantas con base en la prueba del 14C indicó que la edad media el *P. vulgaris* domesticado es de 7680 ± 280 años (Kaplan *et al.*, 1973).

El frijol se ha distribuido ampliamente por todo el mundo debido a su importancia como alimento básico en muchas culturas. En la actualidad, el frijol se cultiva en una amplia variedad de entornos, desde regiones tropicales y subtropicales de América, África y Asia debido a su capacidad de adaptarse a diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas. En América Latina, países como México, Brasil y Colombia son importantes productores y consumidores de frijoles. En África, países como Nigeria, Uganda y Tanzania también tienen una producción significativa de frijoles. Además, en Asia, India y China son grandes productores de esta leguminosa (Beebe *et al.*, 2012). Esta adaptabilidad ha permitido que el frijol se convierta en una fuente importante de proteína vegetal en muchas dietas alrededor del mundo (Singh, 2001).

3.2 Importancia económica del cultivo del frijol

El frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) es uno de los cultivos de gran importancia económica tanto a nivel local como global, debido a su alto valor nutricional y su relevancia en la seguridad alimentaria. Este cultivo tiene un papel crucial e importante en la economía de muchos países en desarrollo, es una fuente vital de proteínas, fibra, vitaminas y micronutrientes, lo que lo convierte en un componente esencial de la dieta en muchas culturas. Su consumo regular contribuye a la mejora de la salud pública y la nutrición, especialmente en comunidades con acceso limitado a otros tipos de proteínas (Pachico & Johnson, 2003).

En muchas regiones de América Latina, África y Asia, la producción y comercialización del frijol generan ingresos significativos para los pequeños agricultores. La venta de frijoles en mercados locales y su exportación contribuyen a la economía de estos países, mejorando las condiciones de vida de los agricultores y fomentando el desarrollo rural (CIAT, 2016).

Por lo tanto, el frijol no solo juega un papel crucial en la economía sino que también en la sostenibilidad agrícola debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico en el suelo,

mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos (Graham y Vance, 2003).

3.3 La producción de frijol en México

La producción de frijol es crucial para la economía agrícola de México. Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2020), México es uno de los principales productores de frijol a nivel mundial, con una producción anual de aproximadamente 1.2 millones de toneladas. Este cultivo ha sido fundamental en la dieta mexicana y en la agricultura desde tiempos prehispánicos, y continúa siendo una fuente vital de proteínas y otros nutrientes esenciales para la población (López & García, 2018).

El frijol *Phaseolus vulgaris L.* por su alto contenido proteico (20-25%) entre las leguminosas es el tercer cultivo más importante en el mundo, después de la soya y el cacahuate (SINGH *et al.*, 1999). Como la mayoría de las leguminosas sus proteínas son deficientes en aminoácidos azufrados como la metionina y la cisteína, sin embargo, cabe destacar que una ingesta regular de frijol favorece en la disminución de los niveles de colesterol y reduce los riesgos de padecer cáncer (ANDERSON and GUSTAFSON, 1989). Particularmente en México, el frijol es la leguminosa de mayor consumo humano ya que representa el 36% de la ingesta diaria de proteínas.

El cultivo de frijol no solo tiene grandes cantidades de proteínas también genera ingresos para los agricultores y una fuente importante de empleo en las zonas rurales (FAO, 2019). Las prácticas agrícolas sostenibles y la adopción de tecnologías modernas han mejorado la eficiencia y la productividad del cultivo de frijol en diversas regiones (INEGI, 2021). En México las técnicas de producción de frijol, varían significativamente entre las diferentes regiones del país. En el norte, donde las condiciones climáticas son más áridas, se utilizan métodos de riego más intensivos, mientras que en el sur, donde las precipitaciones son más abundantes, prevalece la agricultura temporal (Méndez *et al.*, 2020).

3.4 La producción de frijol en Chiapas

Chiapas es uno de los estados más biodiversos y agrícola del país. Además, principal productor de frijol en México, ya que contribuye significativamente a la seguridad alimentaria nacional (SADER, 2021).

Las prácticas agrícolas en Chiapas varían dependiendo de la región y las condiciones climáticas. Sin embargo, se ha observado que muchos productores aún utilizan métodos tradicionales de cultivo, como la milpa, que es un sistema de policultivo que incluye maíz, frijol y calabaza (Acosta-Díaz *et al.*, 2017). Este sistema no solo mejora la biodiversidad agrícola, sino que también contribuye a la sostenibilidad del suelo.

Un estudio de Hernández-Santiago *et al.* (2018) resalta que las enfermedades del frijol y la variabilidad climática son los principales factores que afectan la producción, rendimiento y calidad. Las plagas como el gorgojo del frijol (*Acanthoscelides obtectus*) y enfermedades como el mosaico común del frijol (causado por el Bean common mosaic virus, BCMV) son amenazas constantes para los cultivos (Flores *et al.*, 2019).

Los productores de frijol en Chiapas enfrentan varios desafíos, incluyendo problemas de acceso a tecnología moderna, financiamiento limitado y fluctuaciones climáticas. La falta de infraestructura adecuada y la insuficiencia en la capacitación técnica limitan la capacidad de los agricultores para mejorar sus rendimientos. La variabilidad climática aumenta la incertidumbre para los agricultores, quienes deben adaptar sus prácticas a condiciones impredecibles (Herrera *et al.*, 2019). Por lo que, las sequías prolongadas y las lluvias intensas afectan significativamente la producción de frijol (Magaña *et al.*, 2020).

3.5 Concepto de estrés

El estrés es un estado de tensión física o emocional originado como reacción a una estímulo o presión, puede ser positivo o negativo, que puede desencadenar una serie de respuestas fisiológicas y psicológicas que afectan el bienestar general del individuo” (Lazarus y Folkman, 1984).

3.5.1 Tipos de estrés

3.5.1.1 Estrés Biótico

El estrés biótico es causado por organismos vivos como patógenos (bacterias, hongos y virus) e insectos. El ataque de patógenos puede desencadenar respuestas de defensa en las plantas de frijol, como la producción de compuestos antimicrobianos y el fortalecimiento de las paredes celulares (Mellado-Vázquez *et al.*, 2011). Por ejemplo, la antracnosis, causada por el hongo *Colletotrichum lindemuthianum*, es una enfermedad devastadora que afecta el rendimiento del frijol y requiere un manejo adecuado para su control (Schwartz *et al.*, 2005).

3.5.1.2 Estrés abiótico

El estrés abiótico incluye factores ambientales adversos como la sequía, la salinidad, temperaturas extremas y deficiencias de nutrientes. La sequía es uno de los principales factores que limitan la productividad del frijol (Beebe *et al.*, 2013). Según Singh (2007), la respuesta del frijol a la sequía incluye la reducción del crecimiento vegetativo, disminución de la fotosíntesis y alteraciones en la absorción de nutrientes. Por otro lado, la salinidad afecta negativamente la germinación y el desarrollo de las plantas de frijol al causar desequilibrio iónico y estrés osmótico (Gama *et al.*, 2007).

Cuando una planta se somete a estrés abiótico ocurren una serie de eventos tempranos que permiten la detección del estrés. Se producen alteraciones iniciales en la célula: cambios en la fluidez de membranas, activación de canales iónicos de calcio (Ca^{2+}), modificaciones en la estructura de proteínas y del citoesqueleto, interacciones ADN-proteína, desplazamiento de histonas, variaciones en reacciones enzimáticas y en el metabolismo redox, así como en la dinámica del ARN y microARN (Figura 2). Estas señales desencadenan procesos de transducción de señales, donde intervienen el calcio, quinasas y fosfatasas, especies reactivas de oxígeno (ROS), factores de transcripción y hormonas. Todo este entramado de señales conduce a dos posibles desenlaces: la aclimatación, mediante la reorganización del transcriptoma, el proteoma y el metaboloma, o la muerte celular programada (PCD), cuando el daño resulta irreparable (Figura 2).

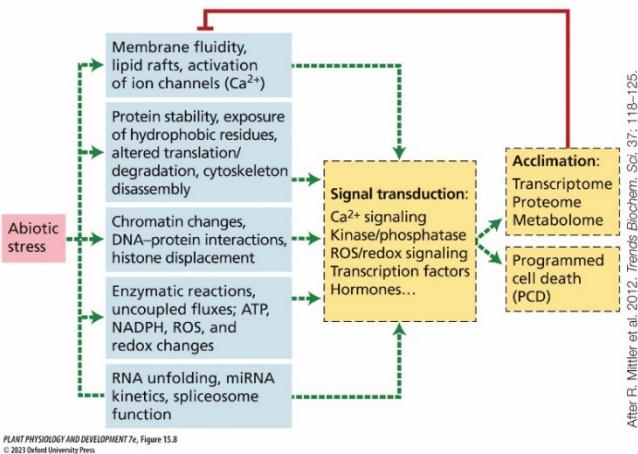


Figura 2. Eventos tempranos en la detección del estrés abiótico por parte de las plantas (cuadros azules) y las vías de transducción de señales y aclimatación activadas por estos eventos (cuadros con bordes discontinuos). Tomado de R. Mittler *et al.* 2012. Trends Biochem. Sci. 37: 118–125.) y publicado por Taiz *et al.* (2023)

3.5.2 Concepto de estrés hídrico

El estrés hídrico es una condición ambiental adversa que afecta a las plantas cuando el agua disponible es insuficiente para satisfacer las necesidades fisiológicas. Este fenómeno tiene impactos significativos en el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, incluidas las leguminosas (*Phaseolus vulgaris L.*) (Taiz & Zeiger, 2010).

Cuando las plantas de frijol se enfrentan al estrés hídrico, desencadenan diversas respuestas fisiológicas y bioquímicas para minimizar el daño y garantizar la supervivencia. Estas respuestas incluyen crecimiento reducido, cierre de estomas para reducir la transpiración, acumulación de osmoprotectores y activación de mecanismos antioxidantes (Chaves *et al.*, 2003; Farooq *et al.*, 2009).

El estrés hídrico puede provocar tasas reducidas de fotosíntesis, alteraciones del metabolismo y reducción del rendimiento y la calidad de las leguminosas. La gravedad de estos efectos depende de la intensidad y duración del estrés, así como de la etapa de desarrollo de la planta (Boutraa & Sanders, 2001).

3.5.4 Manifestación del estrés hídrico en las plantas

El estrés hídrico se manifiesta en tres diversas maneras en las plantas de frijol ya sea morfológicas, fisiológicas o bioquímicas. A nivel morfológico, se observa una reducción en el tamaño de las hojas y una disminución en la altura de la planta. La reducción del área foliar es una respuesta adaptativa para disminuir la pérdida de agua por transpiración (Araus *et al.*, 2018). Además, se puede presentar un incremento en la senescencia foliar y una disminución en el número de flores y frutos (Polanía *et al.*, 2017).

En términos fisiológicos, el estrés hídrico afecta la tasa de fotosíntesis, la transpiración y la conductancia estomática. La disminución de la fotosíntesis se debe, en gran medida, a la cerradura de los estomas, que limita la entrada de CO₂ necesario para la fotosíntesis (Chaves *et al.*, 2009). Adicionalmente, el estrés hídrico provoca un desequilibrio en el balance hídrico de la planta, afectando la absorción de nutrientes y el transporte de agua (Manavalan *et al.*, 2009).

A nivel bioquímico, el estrés hídrico induce la acumulación de compuestos osmoprotectores como prolina, glicina betaína y azúcares solubles. Estos compuestos ayudan a mantener la turgencia celular y a proteger las estructuras celulares contra el daño causado por la deshidratación (Kaur *et al.*, 2017). Además, se incrementa la actividad de enzimas antioxidantes, como la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT), para contrarrestar el estrés oxidativo generado por la sequía (Gill & Tuteja, 2010).

3.5.5 Clasificación de las plantas frente a la disponibilidad de agua

Las plantas se pueden dividir en tres categorías principales según su respuesta a la humedad: tolerantes a la sequía, moderadamente tolerantes a la sequía y sensibles a la sequía (Beebe *et al.*, 2013). Las variedades de leguminosas tolerantes a la sequía poseen características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que les permiten sobrevivir y producir en condiciones de escasez de agua. Estas plantas suelen tener sistemas de raíces profundos y eficientes, alta eficiencia en el uso del agua (WUE) y mecanismos bioquímicos que les permiten mantener la integridad celular bajo estrés hídrico (Rao *et al.*, 2013).

Las leguminosas moderadamente tolerantes a la sequía pueden resistir el estrés hídrico a corto plazo sin sufrir pérdidas significativas de rendimiento. (Blair *et al.*, 2012). El estrés hídrico afecta el rendimiento de las leguminosas en Múltiples niveles, desde la reducción de

la formación de flores y vainas hasta la reducción del tamaño y número de semillas. Las variedades tolerantes a la sequía tienden a mostrar menores reducciones de rendimiento en condiciones de estrés hídrico en comparación con las variedades sensibles (Ramírez-Vallejo & Kelly, 1998).

La mejora genética de la tolerancia a la sequía es una estrategia clave para desarrollar variedades de leguminosas más tolerantes a la sequía. Esto incluye identificar y seleccionar genotipos con rasgos deseados, como sistemas de raíces profundas e incorporar estos rasgos en programas de mejoramiento (Beebe *et al.*, 2013).

3.5.6 Efecto del estrés hídrico en las plantas

El estrés hídrico es una de las principales limitantes para la producción agrícola, afectando directamente el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas. En el caso del frijol (*Phaseolus vulgaris L*), el estrés hídrico puede causar una serie de respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares que afectan negativamente su crecimiento y productividad. Algunas especies como la Soya cambia la disposición de sus hojas cuando crece bajo estrés hídrico severo (Figura 3).



PLANT PHYSIOLOGY AND DEVELOPMENT 7e, Figure 15.25
© 2023 Oxford University Press

Figura 3. Efecto del estrés hídrico en plantas de soya (Créditos en la imagen).

En efectos fisiológicos el estrés reduce la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces, lo que disminuye la turgencia celular y, en consecuencia, afecta el crecimiento de la planta (Farooq *et al.*, 2009). Además, se reduce la apertura estomática para minimizar la pérdida de agua por transpiración, lo que también limita la fotosíntesis y, por ende, la producción de biomasa (Chaves *et al.*, 2002). Por otra parte, el estrés en efectos

bioquímicos bajo condiciones de estrés hídrico, las plantas de frijol incrementan la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que puede causar daño celular (Mittler, 2002). Para contrarrestar este efecto, las plantas activan mecanismos antioxidantes, como la síntesis de enzimas como la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) (Mittler *et al.*, 2004).

3.5.6.1 Efecto en el crecimiento de las plantas

Diversos factores pueden influir en el crecimiento y desarrollo de las plantas de frijol, incluyendo la luz, el agua, la temperatura y los nutrientes del suelo. El estrés hídrico tiene efectos significativos sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las leguminosas para comprender los mecanismos de respuesta al estrés hídrico y desarrollar estrategias de mitigación se debe tomar en cuenta de que son cruciales para garantizar la productividad y la sostenibilidad del cultivo de leguminosas en condiciones de sequía. El crecimiento de las plantas de frijol está influenciado por múltiples factores ambientales y nutricionales. Para optimizar la producción de frijol, es esencial mantener condiciones adecuadas de luz, agua, temperatura y nutrientes en el suelo.

Las plantas de frijol crecen mejor bajo condiciones de luz óptima, con un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad. La luz insuficiente resultó en un crecimiento elongado y menos hojas (Smith, 1994). El riego adecuado puede ser crucial para el crecimiento de las plantas de frijol. El exceso de agua puede causar enfermedades fúngicas, mientras que la falta de agua resulta en plantas más pequeñas y con menor producción de hojas (Jones *et al.*, 2010). Además, las temperaturas óptimas para el crecimiento del frijol están entre 20-25°C. Temperaturas más altas o más bajas afectaron negativamente el desarrollo de las plantas (Adams & Langton, 2005). La disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo influye significativamente en el crecimiento de las plantas de frijol. Suelos ricos en nutrientes promovieron un crecimiento más vigoroso y una mayor biomasa (López-Bellido *et al.*, 2003).

3.5.6.2 Efecto en el régimen hídrico de las plantas

El cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris L*) se ve significativamente afectado por el régimen hídrico, es decir, por la disponibilidad y el manejo del agua. Además, de la cantidad y la frecuencia del riego que puede influir en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del frijol. El agua es un recurso crucial e importante para las plantas de frijol, ya que interviene en procesos vitales como la fotosíntesis, la transpiración y el transporte de nutrientes. Un régimen hídrico adecuado puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la productividad del cultivo.

El manejo adecuado del régimen hídrico es fundamental para maximizar el rendimiento y la calidad del cultivo de frijol. Las prácticas como el riego deficitario controlado, el mulching y el uso de variedades tolerantes a la sequía pueden ayudar a mitigar los efectos negativos del estrés hídrico. El riego deficitario controlado es una técnica que consiste en suministrar agua en cantidades menores pero en momentos críticos del desarrollo del cultivo. Según Turner *et al.* (2001), el riego deficitario puede mejorar la eficiencia del uso del agua sin comprometer significativamente el rendimiento. Mientras que la práctica de mulching es una técnica donde el uso de coberturas vegetales o plásticas puede reducir la evaporación del suelo y conservar la humedad. Zhang *et al.* (2005) demostraron que el mulching puede reducir la pérdida de agua y mejorar la eficiencia hídrica. Por otro lado, la técnica de variedades que son tolerantes a la sequía tiene una mayor tolerancia a condiciones de estrés hídrico por el desarrollo y el uso de variedades de frijol. Beebe *et al.* (2008) sugieren que la selección de variedades tolerantes es una estrategia viable para enfrentar la escasez de agua.

3.5.6.3 Efecto del estrés hídrico en la fotosíntesis

El estrés hídrico tiene un impacto significativo en la fotosíntesis de las plantas, afectando diversos procesos fisiológicos y bioquímicos esenciales. Una de las primeras respuestas de las plantas al estrés hídrico es la reducción de la apertura estomática. Los estomas son poros en las hojas que permiten el intercambio de gases, incluido el dióxido de carbono (CO₂), que es crucial para la fotosíntesis. Cuando las plantas experimentan estrés hídrico, tienden a cerrar sus estomas para minimizar la pérdida de agua por transpiración. Sin embargo, este

cierre también limita la entrada de CO₂, lo que disminuye la tasa de fotosíntesis y afecta la producción de energía y biomasa en la planta (Flexas *et al.*, 2004).

Además de la reducción de la apertura estomática, el estrés hídrico también afecta negativamente la conductancia estomática, que es la facilidad con la que el CO₂ puede entrar en las hojas. Con una menor conductancia estomática, la cantidad de CO₂ disponible en el interior de las hojas se reduce, lo que limita la fotosíntesis. Este proceso se ve agravado por la degradación de los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila. Los pigmentos fotosintéticos son esenciales para la captura de luz y la producción de energía durante la fotosíntesis. El estrés hídrico puede causar una degradación de la clorofila y otros pigmentos, disminuyendo así la eficiencia de la fotosíntesis y la capacidad de la planta para convertir la luz solar en energía química. Sin embargo, la deshidratación puede causar daño estructural a los tilacoides, donde se lleva a cabo la fase luminosa de la fotosíntesis, afectando la generación de ATP y NADPH necesarios para la fase oscura (Chaves *et al.*, 2009).

Además, el transporte de electrones, un proceso vital para la generación de ATP y NADPH durante la fotosíntesis, puede verse interrumpido por el estrés hídrico, disminuyendo la producción de energía. A largo plazo, el estrés hídrico tiene consecuencias significativas en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La disminución en la fotosíntesis reduce la producción de carbohidratos, afectando el crecimiento y desarrollo general de la planta. Las plantas sometidas a estrés hídrico suelen tener una menor producción de biomasa y rendimiento de cosecha. Algunas plantas desarrollan adaptaciones y respuestas para mitigar los efectos del estrés hídrico, como la reducción del tamaño de las hojas, el desarrollo de raíces más profundas, y la acumulación de osmoprotectores.

El estrés hídrico puede aumentar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), moléculas que pueden causar daño celular cuando están en niveles elevados. Estas ROS pueden dañar proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, afectando negativamente la fotosíntesis y otros procesos celulares (Mittler, 2002).

3.5.6.4 Efecto del estrés hídrico en el rendimiento

El estrés hídrico tiene efectos profundos en el rendimiento de las plantas, impactando múltiples aspectos del crecimiento y la productividad agrícola. Una de las primeras consecuencias del estrés hídrico es la reducción de la tasa de fotosíntesis debido al cierre de los estomas, que las plantas usan para controlar la pérdida de agua. Este cierre limita la entrada de dióxido de carbono (CO_2), esencial para la fotosíntesis, y resulta en una menor producción de carbohidratos. La disminución en la producción de carbohidratos afecta directamente el crecimiento de las plantas, ya que estos compuestos son fundamentales para el desarrollo de tejidos y órganos.

El rendimiento bajo estrés hídrico en plantas de frijol puede ser bastante significativo ya que puede afectar negativamente varios aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas de frijol, incluyendo la germinación de las semillas, el crecimiento de las raíces, la fotosíntesis, la floración y la formación de vainas. Esto puede resultar en una disminución del rendimiento en términos de producción de biomasa, número y tamaño de los granos, y en última instancia, la calidad del cultivo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

El estudio se realizó en las instalaciones de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), sede Villa Corzo, se utilizaron semillas de frijol negro variedad Verdín y frijol rojo variedad Sangre Maya. Ambos cultivares se sembraron el día 7 de septiembre de 2023. Durante el crecimiento y desarrollo de las plantas se realizaron 3 fertilizaciones a razón de 0.5 g por planta y dos aplicaciones de insecticida (Karate ®) a razón de 2.5 mL/Litro de agua, para el control de lepidópteros y crisomélidos. El sustrato utilizado fue *Peat moss* en macetas de 500 mL de capacidad.

4.2 Tratamientos

Se sembraron dos semillas de frijol de las variedades Verdín y Sangre Maya en cada macetas de 500 mL de capacidad con un sustrato a base de Peatmoss. Posterior a la emergencia se dejó solamente una planta por maceta. Cuando las plantas emitieron tres hojas trifoliadas (V4), un tratamiento se sometió a estrés hídrico suspendiendo el riego cinco días hasta que las plantas alcanzaron la marchitez temporal y se reanudó nuevamente el riego en la fase de prefloración (R5). El tratamiento sin estrés se mantuvo bajo riego cada dos días durante todas sus fases fenológicas. Los tratamientos tuvieron 15 repeticiones y cada planta por maceta se consideró una unidad experimental. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar. Ambos tratamientos se fertilizaron foliarmente durante las fases V4 y R5 con Bayfolan® a una dosis de 10 mL/L de agua por planta.

4.3 Variables medidas

Se realizó un muestreo destructivo de 10 plantas por tratamientos a los 32 días después de la siembra correspondiente a la fase R5 (inicio de la floración). En cada planta se determinaron las siguientes variables:

4.3.1 Crecimiento

Masa seca de raíz, tallo y hojas (g). A las plantas seleccionadas se le midieron la altura, área foliar y longitud de la raíz, posteriormente se disectaron en hoja, tallo y raíz y se colocaron en una estufa durante 72 horas a 80 °C. Posteriormente se pesaron en una balanza Sartorius con una precisión de 0.01g.

4.3.2 Índices de crecimiento

4.3.2.1 Fracción de peso foliar (RPF): Se calculó dividiendo el peso seco de las hojas entre el peso seco total de la planta:

$$FPF =$$

PSH: Peso seco de las hojas

PSP: Peso seco de la planta

4.3.2.2 Fracción de masa radicular: Se calculó dividiendo el peso seco de la raíz entre el peso seco de la planta.

$$FPR =$$

PSR: Peso seco de la raíz

PSP: Peso seco de la planta

4.3.2.3 Longitud específica de la raíz (LER, cm g⁻¹): Se calculó dividiendo la longitud de la raíz (cm) entre el peso seco de la raíz (g).

$$LER = (\text{cm g}^{-1})$$

LR: Longitud de la raíz (cm)

PSR: Peso seco de la raíz (g)

4.3.3 Fluorescencia de la clorofila y contenido de clorofilas a + b

Antes de arrancar las plantas se midió el contenido de clorofilas totales con un medidor portátil de clorofilas tomando dos lecturas de las hojas de la parte media de las plantas a las 09:00, 12:00 y 15:00 horas. La fluorescencia de la clorofila se determinó con un

fluorómetro tomando una lectura de las hojas de la parte media de seis plantas por tratamientos, a las 09:00 horas.

4.3.4 Indicadores del régimen hídrico de la planta

Contenido Relativo de Agua (CRA, %): Se tomaron seis discos foliares y se les determinaron el peso fresco (g), peso turgente (PT) y el peso seco (PS) a las 09:00, 12:00 y 15:00 horas. El CRA se calculará usando la siguiente fórmula:

$$\text{CRA (\%)} = * 100$$

Donde:

CRA: Contenido Relativo de Agua foliar (%)

PF: Peso fresco del disco (g)

PT: Peso turgente del disco (g)

PS: Peso seco del disco (g)

4. 4 Análisis estadísticos

Los datos se sometieron a un análisis de varianza bifactorial, considerando el factor A (A1: variedad Verdín y B2: variedad Sangre Maya) y el factor B (B1: con estrés y B2: sin estrés). La comparación de medias se realizará a través de la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la experimentación muestran una reducción significativa del crecimiento vegetativo de las plantas de ambas variedades sometidas a estrés hídrico con respecto al grupo control. Sin embargo, entre las variedades no hubo diferencias significativas. En términos de características morfológicas y fisiológicas. Los hallazgos también revelan que la altura de la planta, el diámetro del tallo, así como la biomasa seca, son significativamente mayores cuando el cultivo no sufre déficit hídrico. Esto sugiere que la disponibilidad adecuada de agua durante el ciclo vegetativo favorece un crecimiento más vigoroso y una mayor producción de biomasa, lo que probablemente contribuye a los rendimientos mejorados observados.

Tabla 1. Efecto del estrés hídrico en el crecimiento de variedades de frijol sometidas a estrés hídrico

Variedades	Tratamientos	Altura de	Diámetro	Longitud	No Hojas
		la planta (cm)	del tallo (mm)	de la raíz(cm)	
Verdin	Control	32.47 b	4.23	23.34	7.13 a
	Estrés hídrico	24.38 c	4.06	20.47	4.47 c
Sangre maya	Control	50.24 a	4.43	23.06	5.83 b
	Estrés hídrico	27.75 c	4.30	20.83	3.79 c
Significación		*	ns	ns	*

* Indica significación estadística para $p \leq 0.05$

Reyes-Matamoros (2014) evaluaron bajo condiciones controladas de estrés hídrico el crecimiento de frijol, encontrando que el peso seco total de raíces no presentó diferencias significativas en el tratamiento con sometido a estrés. Por otro lado, el peso seco total de follaje bajo riego presentó un mayor peso foliar que con estrés hídrico. Serna (2021) encontró que plantas de frijol sometidas a un estrés de humedad, se reduce severamente el índice de área foliar, peso seco, número de granos y el rendimiento, sin embargo, las

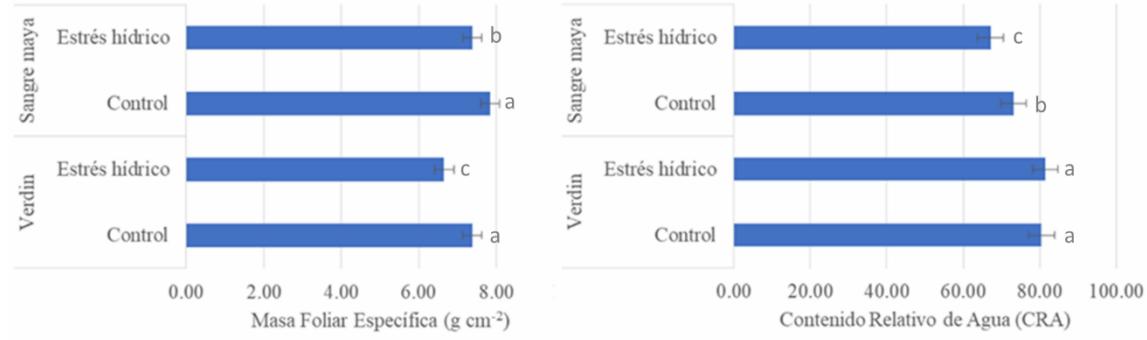
especies mostraron una alta recuperación en crecimiento y producción de vaina cuando se riega después del tratamiento de sequía.

Tabla 2. Efecto del estrés hídrico en la acumulación de biomasa de órganos de las plantas de variedades de frijol Verdín y Sangre Maya.

Variedades	Tratamientos	Peso seco de hojas (g)	Peso seco de tallo (g)	Peso seco de raíz (g)	Peso seco de la planta (g)	Fracción de masa foliar (FMF)	Fracción de masa radicular (FMR)	Longitud Específica de la Raíz (LER, cm g ⁻¹)
Verdin	Control	2.17 a	1.14 a	1.03 a	4.34 a	0.50	0.24 b	22.89 c
	Estrés hídrico	1.12 b	0.64 b	0.81 b	2.57 b	0.43	0.32 a	25.74 b
Sangre maya	Control	1.87 b	0.93 a	1.21 a	4.01 a	0.47	0.30 a	20.08 c
	Estrés hídrico	0.75 c	0.60 b	0.74 b	2.09 b	0.37	0.35 a	29.83 a
Significación		*	*	*		ns	*	*

* Indica significación estadística para $p \leq 0.05$

Babalola (2010) estudió el efecto del estrés hídrico del suelo sobre tres variedades de frijol, encontró que estas redujeron significativamente el crecimiento y el rendimiento (34 y 64%) de las variedades cuando las plantas estaban en la etapa de floración y fructificación. Al respecto, Farooq *et al.* (2016) indicaron que los cultivos de leguminosas eluden la sequía madurando antes de que se desarrolle una deficiencia sustancial en la humedad del suelo. Por otra parte, Culqui *et al.* (2021) reportaron que el estrés hídrico inhibió en diferente grado la acumulación de materia seca en los fitómeros, sus componentes y ramas, así como el área foliar de acuerdo a la posición de la planta y las etapas de desarrollo, presentando una reducción en el área foliar y en el peso seco. Este patrón sugiere una relación estrecha entre el agua disponible y la expresión de características morfológicas y productivas clave en el ciclo de vida del cultivo.



Por su parte, la concentración de pigmentos fotosintéticos tuvo una disminución significativa en los tratamientos sometidos a estrés hídrico con respecto al control (Figura 1).

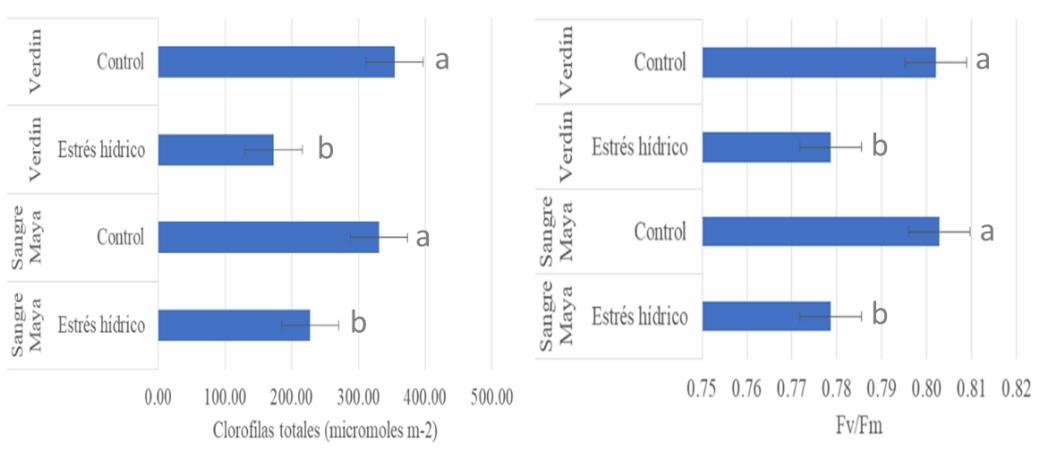


Figura 2. Clorofillas a + b ($\mu\text{mol m}^{-2}$) (A) y rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria (Fv/Fm) (B) en tratamientos de frijol variedad Sangre Maya y Verdín.

La disminución del contenido clorofila bajo condiciones de déficit hídrico ha sido también reportada en otras especies, dependiendo la severidad y la duración del estrés (Mafakheri *et al.*, 2010). En este aspecto, una reducción del contenido total de clorofila bajo estrés hídrico señala una baja capacidad de los centros de reacción de la luz con el propósito evitar daños de especies reactivas de oxígeno, ya que la producción de estas es impulsada

principalmente por el exceso de absorción de energía en el aparato fotosintético (Borjas *et al.*, 2015). Como consecuencia de las disminuciones en los valores del contenido de clorofillas, se desprende la reducción del crecimiento y desarrollo de las plantas en tales condiciones, dado por las afectaciones en la absorción y conversión de la luz solar, como primer proceso de la foto-síntesis y, por consiguiente, la fijación del carbono y síntesis de carbohidratos (Argentel *et al.*, 2006).

Por otro lado, el efecto negativo que puede generar una condición de déficit hídrico sobre la eficiencia máxima del PSII fotoquímica (Fv/Fm) depende de la duración y la severidad del estrés (Aranjuelo *et al.*, 2011). En este contexto, los resultados obtenidos indican que un periodo de 20 días de duración de estrés hídrico redujo significativamente la actividad del fotosistema II. Similares observaciones fueron obtenidas por Dias y Brüggemann. (2010) en *Phaseolus vulgaris* donde encontraron que plantas bajo condición de estrés hídrico reducen la actividad fotosintética considerablemente comparadas con las plantas control.

Estos resultados respaldan la importancia de gestionar cuidadosamente el agua durante el cultivo de frijol, destacando la necesidad de medidas efectivas para prevenir tanto el exceso como el déficit de humedad. La gestión adecuada del riego podría ser crucial para optimizar la producción de frijol y garantizar un rendimiento óptimo. Estos hallazgos también podrían tener implicaciones prácticas para los agricultores, proporcionando una base científica para el desarrollo de estrategias de manejo del agua que mejoren la productividad y la sostenibilidad de los cultivos de frijol.

Los resultados resaltan la importancia del agua para diversos aspectos del crecimiento vegetativo, ya que la altura de la planta, el diámetro del tallo, el largo de la raíz, así como el número de hojas, y la biomasa seca, también exhibieron un desempeño superior en el tratamiento control sin déficit hídrico. Este patrón sugiere una relación estrecha entre el agua disponible y la expresión de características morfológicas y fisiológicas clave en el ciclo de vida de la planta.

6. CONCLUSIONES

El estrés hídrico en las plantas de frijol afecta significativamente las características morfológicas, fisiológicas y por ende el crecimiento de las plantas.

El estrés hídrico inhibe la síntesis de clorofillas totales en ambas variedades de frijol y afecta el rendimiento cuántico del fotosistema II.

El estrés hídrico provoca un impacto significativo en el crecimiento vegetativo del frijol, lo que puede tener implicaciones importantes en la producción y calidad del cultivo. Estos hallazgos resaltan la importancia del agua en la producción de frijol y pueden ser útiles para desarrollar estrategias de manejo del agua en la agricultura, especialmente en regiones donde la disponibilidad de agua es limitada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta-Díaz, E., Hernández-Torres, I., Rodríguez-Guerra, R., Acosta-Gallegos, J. A., Pedroza-Flores, J., Amador-Ramírez, M. D., & Padilla-Ramírez, J. S. (2011). Efecto de la sequía en la producción de biomasa y grano de frijol. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(2), 249–263.
2. Aranjuelo, I., Molero, G., Erice, G., Avíce, J. C., & Nogués, S. (2011). Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 111–123. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq249>
3. Argentel, L., González, L. M., Ávila, C., & Aguilera, R. (2006). Comportamiento del contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos fotosintéticos de variedades de trigo cultivadas en condiciones de salinidad. *Cultivos Tropicales*, 27(3), 49–53. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215825008>
4. Borjas, R., Rebaza, D., & Julca, A. (2015). Contenido hídrico de dos variedades de olivo (*Olea europaea* L.) en el Valle de Cañete, Lima-Perú. *Scientia agropecuaria*, 6(3), 147–154. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.03.01>
5. Culqui, Y. L., Neri, J., Valqui, N. C. V., Meléndez-Mori, J. B., Huamán, E. H., & Oliva, M. (2021). Efecto del estrés hídrico sobre el comportamiento morfofisiológico de cinco genotipos de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Científica Pakamuros*, 9(2), 73-86. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v9i2.18>
6. Dias, M. C., & Brüggemann, W. (2010). Limitations of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* under drought stress: Gas exchange, chlorophyll fluorescence and Calvin cycle enzymes. *Photosynthetica*, 48(1), 96–102. <https://doi.org/10.1007/s11099-010-0013-8>
7. López-Salinas, E., Tosquy-Valle, Ó. H., Villar-Sánchez, B., Acosta-Gallegos, J. A., Rodríguez-Rodríguez, J. R., & Andrés-Meza, P. (2015). Yield and stability of improved lines of black bean in Veracruz and Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 173–181.
8. Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Chávez-Rivero, J. A., & Samaniego-

- Gaxiola, J. A. (2013). Tolerancia al estrés hídrico y fitosanitario mediante indicadores agronómicos y fisiológicos en diferentes variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31(2), 91–104. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092013000200002&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v31n2/v31n2a2.pdf
9. Pliego-Marín, L., López-Baltazar, J., & Aragón-Robles, E. (2018). Características físicas, nutricionales y capacidad germinativa de frijol criollo bajo estrés hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1197–1209. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1283>
10. Polón, C. R., Miranda-Caballero, A., Maqueria-López, L. A., & Ramírez-Arrebato, M. A. (2013). Efecto de diferentes intensidades de estrés hídrico en la fase vegetativa en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 60–64.
11. Polón, R., Ruiz, M., Miranda, A., & Ramírez, M. A. (2017). Efectos del estrés hídrico sobre el rendimiento de los granos del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(1), 66–70.
12. Rodríguez-Laramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., La O-Arias, M. A., Romero-José, E., Hernández-García, V., & Salas-Marina, M. Á. (2021). Efecto Del Aluminio En El Crecimiento Y Contenido De Clorofila En Plántulas De Maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(1), 25. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.1.25>
13. Serna, R. R., Flores-Gallardo, H., López-González, J. C., Rubiños-Panta, J. E., Ortiz-Sánchez, I. A., Flores-Magdaleno, H., ... y Martínez, P. A. D. (2021). Fenología y productividad del agua en variedades mejoradas de frijol pinto cultivadas en durango, méxico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(4), 511. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.511>
14. Tosquy-Valle, O. H., López-Salinas, E., Villar-Sánchez, B., Acosta-Gallegos, J. A., & Rodríguez-Rodríguez, J. R. (2016). Verdín : variedad de frijol negro tolerante a sequía terminal para Veracruz y Chiapas , México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1775–1780.
15. Villar-Sánchez, B., Tosquy-Valle, O. H., López-Salinas, E., & Acosta-Gallegos, J. A. (2016). Sangre Maya , variedad de frijol de grano rojo para el estado de Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(6), 1485–1491.

16. Acosta-Díaz, E., Villalobos-Reyes, S., Ramírez-Vallejo, P., & Castro-Rocha, A. (2017). El sistema milpa: una estrategia sustentable para la producción de alimentos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 151-162.
17. Adams, S. R., & Langton, F. A. (2005). The effects of temperature on the growth and development of plants. *Journal of Experimental Botany*, 56(410), 405-413.
18. Anderson and Gustafson, "Hypocholesterolemic effects of oat and bean products", *Michigan Dry Bean Digest*, 1989, 13, pp. 2-5.
19. Araus, J. L., Slafer, G. A., Royo, C., & Serret, M. D. (2018). Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(3), 377-412.
20. Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, 4, 35.
21. Bitocchi, E., Nanni, L., Bellucci, E., Rossi, M., Giardini, A., Zeuli, P. S., Logozzo, G., Stougaard, J., McClean, P., Attene, G., & Papa, R. (2012). Mesoamerican origin of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is revealed by sequence data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(14), E788-E796.
22. Boicet, T.: (2010). "Estrés hídrico y la distribución de características vegetativas y reproductivas en el genotipos de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L)", En: II Simposio de Ecofisiología Vegetal, XVII Congreso Científico Internacional del INCA, La Habana, Cuba, p. 145, ISBN: 978-959-07-1363-7
23. Boutraa, T., & Sanders, F. E. (2001). Effects of water stress on growth, water use efficiency, and nitrogen fixation of *Phaseolus vulgaris*. *Agricultural Water Management*, 51(1), 87-96.
24. Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). Beans (*Phaseolus* spp.) – model food legumes. *Plant and Soil*, 252(1), 55-128.
25. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2016). Annual Report 2016.
26. Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2002). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 29(3), 239-264.

27. Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560.
28. E. Esquivel, J.A. Acosta, J. Ortiz, Ma. del C. Mendoza y S. Padilla, "Fenología y rendimiento de cuatro variedades de frijol en el altiplano central de México", INIFAP, México, 2004, pp. 19-27.
29. FAO. (2019). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Informe sobre la producción mundial de frijol.
30. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212.
31. Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, 6(3), 269-279.
32. Flores, R., Rodríguez, M., & Pérez, J. (2019). Impacto de las plagas y enfermedades en la producción de frijol en México. *Revista de Agricultura*, 45(2), 150-162.
33. Freytag, G. F., & Debouck, D. G. (2002). Taxonomy, distribution, and ecology of the genus *Phaseolus* (Leguminosae-Papilionoideae) in North America, Mexico and Central America. *Botanical Research Institute of Texas*.
34. Gama, P. B., Inanaga, S., Tanaka, K., & Nakazawa, R. (2007). Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. *African Journal of Biotechnology*, 6(2), 79-88.
35. Gentry H S (1969) Origin of the common bean, *Phaseolus vulgaris*. *Econ. Bot.* 23:55-69.
36. Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909-930.
37. Graham, P. H., & Vance, C. P. (2003). Legumes: importance and constraints to greater use. *Plant Physiology*, 131(3), 872-877.
38. Hernández-Santiago, A., Hernández-Santiago, F., Gómez-Merino, F. C., & Trejo-Téllez, L. I. (2018). Factores que limitan la producción de frijol en México. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 451-462.

39. Herrera, R., Martínez, A., & Sánchez, L. (2019). Variabilidad climática y su impacto en la producción de frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 23-35.
40. INEGI. (2021). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Estadísticas agrícolas de México*.
41. Jones, H. G., Tardieu, F., & Davies, W. J. (2010). Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 61(12), 3199-3216.
42. Kaplan L (1965) Archeology and domestication in American Phaseolus (beans). *Econ. Bot.* 19:358-368.
43. Kaplan L, T F Lynch, C E Smith (1973) Early cultivated beans (*Phaseolus vulgaris*) from an intermontane Peruvian valley. *Science* 179:76-77.
44. Kaur, G., Asthir, B., & Bains, N. S. (2017). Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia Plantarum*, 61(3), 319-329.
45. Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). Stress, appraisal, and coping. New York: Springer Publishing Company.
46. López, A., & García, M. (2018). Historia y evolución del cultivo de frijol en México. En *Revista de Agricultura Mexicana*, 12(1), 15-28.
47. López-Bellido, L., López-Bellido, R. J., & Redondo, R. (2003). Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Research*, 84(3), 169-182.
48. Magaña, V., Pérez, J., & Torres, R. (2020). Efectos del cambio climático en la agricultura mexicana: El caso del frijol. *Clima y Agricultura*, 12(1), 45-63.
49. Manavalan, L. P., Guttikonda, S. K., Tran, L. S., & Nguyen, H. T. (2009). Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology*, 50(7), 1260-1276.
50. Mellado-Vázquez, P. G., Solares, S., Hernández, G., Mora-Romero, G., & Pineda, O. (2011). Defense responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) against *Colletotrichum lindemuthianum*, the causal agent of anthracnose. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 24(8), 982-993.
51. Méndez, J., Pérez, S., & Ramírez, C. (2020). Técnicas de producción de frijol en diferentes regiones de México. *Agronomía Mesoamericana*, 32(2), 125-140.
52. Miranda-Colín S (1967) Origen de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol común). *Agrociencia* 1:99-104.

53. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405-410.
54. Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Van Breusegem, F. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 9(10), 490-498.
55. Pachico, D., & Johnson, N. L. (2003). Common bean production and research in Latin America: Perspectives for the 21st century. CIAT.
56. Polania, J., Poschenrieder, C., Rao, I. M., & Beebe, S. (2017). Root traits and their potential physiological mechanisms of tolerance to intermittent drought in tropical common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica*, 215(11), 202.
57. Polón, P.R.; Miranda, C.A.; Maqueria, L.L.; Ramírez, A.M.: “Efecto de diferentes intensidades de estrés hídrico en la fase vegetativa en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4): 60-64, 2013, ISSN: 2071-0054.
58. Polón, P.R.; Miranda, C.A.; Ramírez, A.M.A.; Maqueira, L.L.A.: “Efectos del estrés de agua sobre el rendimiento de granos en la fase vegetativa en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4): 33-36, 2014, ISSN: 2071-0054.
59. Ramirez-Vallejo, P., & Kelly, J. D. (1998). Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica*, 99(2), 127-136.
60. SADER. (2020). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Producción de frijol en México.
61. Schwartz, H. F., Steadman, J. R., Hall, R., & Forster, R. L. (2005). Compendium of Bean Diseases. The American Phytopathological Society.
62. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021). Informe Anual de Producción Agrícola. SADER.
63. Singh, S. P. (2001). Broadening the genetic base of common bean cultivars. *Crop Science*, 41(6), 1659-1675.
64. SINGH, S. P., H. Teran, C. G. Munoz and J. C. Takegami, “Two cycles of recurrent selection for seed yield in common bean”, *Crop science*, 1999, 39, pp. 391-397.
65. Smith, H. (1994). Sensing the light environment: the functions of the phytochrome family. *Plant Physiology*, 104(2), 371-374.
66. Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. 5th edition. Sinauer Associates.

67. Turner, N. C., Wright, G. C., & Siddique, K. H. M. (2001). Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 71, 193-231.
68. Zhang, S., Sadras, V. O., Chen, X., & Zhang, F. (2005). Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to mulching and tillage practices. *Field Crops Research*, 92(1), 75-85.