

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

SEDE VILLA CORZO

**Efecto del estrés salino en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris*
L., var. Sangre Maya)**

TESIS

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



**INGENIERÍA
AGROFORESTAL**

PRESENTA

EUNICES JUDITH MAGDALENO LOPEZ



Marzo 2026

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

SEDE VILLA CORZO

**Efecto del estrés salino en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris*
L., var. Sangre Maya)**

TESIS

**OMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGROFORESTAL**



**INGENIERÍA
AGROFORESTAL**

PRESENTA

EUNICES JUDITH MAGDALENO LÓPEZ

DIRECTOR

Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi

CODIRECTOR

Dr. Vicente Pérez Madrigal

Marzo 2026





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Villa Corzo, Chiapas
24 de Febrero del 2026

C. **Eunices Judith Magdaleno López**

Pasante del Programa Educativo de:

Ingeniería Agroforestal

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

Efecto del estrés salino en platas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L., var. Sangre Maya)

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

Dra. Rady Alejandra Campos Saldaña

Dr. Vicente Pérez Madrigal

Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi

Firmas:

C.c.p. Expediente



Efecto del estrés salino en plantas de frijol
(*Phaseolus vulgaris* L., var. Sangre Maya)

Índice

I. INTRODUCCIÓN	1
II. HIPÓTESIS	2
III. OBJETIVOS.....	2
3.1 Objetivo general.....	2
3.2 Objetivos específicos	2
IV. MARCO TEÓRICO	3
4.1 Origen y distribución del frijol	3
4.2 Centros de domesticación.....	3
4.3 Parentesco con especies silvestres	3
4.4 Distribución del frijol	4
4.4.1 Expansión en américa.....	4
4.1.2 Distribución actual.....	4
4.5 Importancia del frijol a nivel mundial	4
4.6 Valor nutricional del frijol.....	5
4.7 Importancia del frijol en México	7
4.8 Producción de frijol en México	9
4.9 Regiones productoras de frijol en México.....	9
4.10 Sistemas de producción de frijol.....	9
4.11 Estrés salino. Concepto.....	11
4.12 Efectos del estrés salino en las plantas.....	12
4.12.1 Efectos a nivel fisiológico	12
4.12.2 Efectos a nivel bioquímico y molecular	12
4.13 Mecanismos de tolerancia al estrés salino	12
4.13.1 Tolerancia osmótica	13
4.13.2 Tolerancia al estrés oxidativo	13
4.14 Prácticas agronómicas	13
4.15 Clasificación de las plantas en función de la salinidad	14
4.15.1 Plantas glicófitas (Sensibles a la Salinidad)	14
4.15.2 Plantas moderadamente tolerantes.....	14
4.15.3 Plantas tolerantes (halófitas facultativas).....	14
4.15.4 Plantas halófitas obligatorias (Altamente tolerantes)	15
4.16 Efecto del estrés salino en el crecimiento de las plantas	15

4.16.1 Efecto del estrés salino en la fotosíntesis.....	16
4.16.2 Reducción en la Captación de CO ₂	17
4.16.3 Daño al fotosistema II (PSII).....	17
4.17 Distribución de suelos salinos en Chiapas	18
4.17.1 Principales zonas afectadas	18
4.18 Alteraciones fisiológicas	19
4.19 Mejoramiento genético	19
V. MATERIALES Y MÉTODOS	20
5.1 Establecimiento del experimento	20
5.2 Procedimiento para el cálculo de las concentraciones salinas.....	21
5.3 Medición del crecimiento de las plantas.....	21
5.3.1 Índices de crecimiento	21
5.3.2 Fluorescencia de la clorofila y contenido de clorofilas a + b	22
5.4 Indicadores del régimen hídrico de la planta.....	22
5.4.1 Contenido Relativo de Agua (CRA, %).....	22
5.4.2 Transpiración	23
5.5 Análisis estadísticos.....	23
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
VII CONCLUSIONES	29
VIII BIBLIOGRAFÍA.....	30

RESUMEN

El efecto de la salinidad en las plantas se manifiesta ya sea por el componente osmótico (estrés hídrico) como por la toxicidad que causan las sales. En este sentido y con el objetivo de estudiar el efecto de la salinidad en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L. Var. Sangre Maya) se realizó un experimento en condiciones semicontroladas. Para ello se diseñó un experimento completamente al azar con dos tratamientos (control y salinidad). El tratamiento experimental con sales consistió en someter la planta a riegos progresivos con NaCl hasta llegar a una dosis de 200 mL planta⁻¹ de la solución salina. El tratamiento control se regó con agua a capacidad de campo. Se usaron macetas de un litro de capacidad. El sustrato estuvo compuesto por una mezcla de suelo de vega, arena y peat moss. La unidad experimental estuvo determinada por una planta y cada tratamiento se repitió 15 veces. Los resultados indicaron que el estrés salino afectó de manera significativa el crecimiento, la asignación de biomasa, el funcionamiento del fotosistema II y el estado hídrico de las plantas de frijol. La reducción en la eficiencia fotoquímica y en la asimilación de carbono explicó la disminución en biomasa aérea y en floración. Los resultados confirman que la salinidad actúa simultáneamente como estrés osmótico y como factor que compromete el equilibrio energético del aparato fotosintético, afectando tanto la estructura como el funcionamiento integral de la planta.

Palabras clave: Salinidad, fluorescencia de la clorofila, eficiencia fotoquímica, crecimiento.

ABSTRACT

The effect of salinity on plants is expressed through both its osmotic component (water stress) and the ionic toxicity caused by accumulated salts. In this context, and with the objective of evaluating the effects of salinity on common bean plants (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Sangre Maya), an experiment was conducted under semi-controlled conditions. A completely randomized design was established with two treatments: control and salinity. The salinity treatment consisted of progressively irrigating the plants with NaCl solution until reaching a final dose of 200 mL plant⁻¹ of saline solution. Control plants were irrigated daily with water at field capacity. Plants were grown in one-liter pots containing a substrate composed of a mixture of alluvial soil, sand, and peat moss. The experimental unit consisted of one plant, and each treatment was replicated fifteen times. The results indicated that salt stress significantly affected plant growth, biomass allocation, photosystem II performance, and plant water status. The reduction in photochemical efficiency and carbon assimilation explained the decline in shoot biomass and flowering. These findings confirm that salinity acts simultaneously as an osmotic stress and as a factor that disrupts the energetic balance of the photosynthetic apparatus, thereby affecting both the structural and functional integrity of the plant.

Keywords: Salinity, chlorophyll fluorescence, photochemical efficiency, growth.

I. INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la especie más importante para el consumo humano, entre las leguminosas de grano alimenticias y tiene gran importancia en la dieta de la población mexicana, por su alto contenido proteico y de minerales esenciales, siendo un producto clave en la seguridad alimentaria de la población (Delgado *et al.* 2013).

A pesar de ser un cultivo altamente distribuido a nivel mundial, existen limitaciones, como la salinidad en el suelo, que se convierte en un estrés abiótico complejo que simultáneamente presenta componentes osmóticos e iónicos.

La pérdida de la homeostasis, tanto hídrica como iónica, ocurre tanto a escala celular como a nivel de planta y provoca graves daños moleculares que detienen el crecimiento de la planta. Por una parte, la disminución del potencial hídrico del medio restringe la absorción de agua por las raíces y por otra, la absorción de iones salinos específicos se acumula dentro de los tejidos de la planta en concentraciones que llegan a ser tóxicas y pueden, al mismo tiempo, inducir desequilibrios nutricionales por modificación de la absorción y distribución de nutrientes esenciales (Morales *et al.*, 2010).

El hecho de que, en condiciones salinas, la disponibilidad de agua para las plantas disminuye y estas se ven obligadas a vivir en condiciones de sequía fisiológica, ha motivado el desarrollo de un elevado número de investigaciones encaminadas a dilucidar el efecto de la salinidad en sus relaciones hídricas (González, 2001). Por otro lado, la salinidad afecta la fotosíntesis, principalmente a través de la reducción del área foliar, el contenido de clorofila, la conductancia estomática, y en menor extensión, a través de una disminución de la eficiencia del fotosistema II (Chaves, 2009).

II. HIPÓTESIS

El estrés salino en las plantas de frijol disminuye el crecimiento, la asignación de biomasa entre sus órganos y afecta el rendimiento del fotosistema II.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del estrés salino en el crecimiento y desarrollo de plantas de frijol.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el efecto del estrés salino en el crecimiento de plantas de frijol de la variedad sangre Maya.
- Evaluar la eficiencia del fotosistema II y la concentración de clorofilas de plantas de frijol sometidas a estrés salino.
- Evaluar la transpiración y el contenido relativo de agua (CRA) en plantas de frijol sometidas a estrés salino.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 Origen y distribución del frijol

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa originaria de Mesoamérica y la región andina, donde fue domesticado hace aproximadamente 8,000 años (Gepts & Debouck, 1991). Su dispersión a nivel mundial ocurrió después del contacto entre Europa y América, expandiéndose debido a su adaptabilidad y valor nutricional (Bitocchi et al., 2012). El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las leguminosas más importantes a nivel mundial, tanto por su valor nutricional como por su papel en la seguridad alimentaria. Desde allí, se distribuyó a otras regiones del mundo gracias a los procesos de colonización y comercio global.

4.2 Centros de domesticación

El frijol común (*Phaseolus vulgaris*) fue domesticado de manera independiente en dos regiones principales: Mesoamérica (actual México y Centroamérica) y los Andes (especialmente Perú, Bolivia y Ecuador) (Bitocchi et al., 2012). Estudios genéticos han demostrado que existen dos grupos principales de frijoles: el acervo genético mesoamericano y el acervo genético andino, lo que confirma su domesticación dual (Schmutz et al., 2014).

En Mesoamérica, el frijol fue domesticado hace aproximadamente 8,000 años, mientras que en los Andes su domesticación ocurrió alrededor de 6,000 a 7,000 años atrás (Gepts & Debouck, 1991).

4.3 Parentesco con especies silvestres

El ancestro silvestre del frijol común es *Phaseolus vulgaris* var. *Aborigineus*, que aún crece de forma natural desde el norte de Argentina hasta México (Debouck et al., 1993). Las variedades silvestres son trepadoras y presentan semillas pequeñas, características que fueron modificadas durante la domesticación para obtener plantas más productivas y granos más grandes (Smartt, 1989).

4.4 Distribución del frijol

4.4.1 Expansión en américa

Los frijoles domesticados en Mesoamérica se difundieron hacia el norte (Estados Unidos) y el sur (Colombia, Venezuela), mientras que los frijoles andinos se extendieron por Sudamérica (Chile, Argentina) (Beebe et al., 2001). Con el tiempo, el intercambio entre culturas indígenas permitió la mezcla de ambos acervos genéticos, enriqueciendo la diversidad de la especie. Tras la llegada de los europeos a América en el siglo XV, el frijol fue introducido en Europa, África y Asia. Los españoles y portugueses fueron los principales responsables de su diseminación (Kaplan & Lynch, 1999). A diferencia del maíz, que se adaptó rápidamente, el frijol tardó más en ser adoptado debido a su requerimiento de climas específicos. Sin embargo, para el siglo XVII ya era un cultivo establecido en España, Italia y partes de África (Berglund-Brücher & Brücher, 1976).

En África, el frijol se integró rápidamente a la dieta local, especialmente en países como Kenia, Uganda y Angola, donde se convirtió en un alimento básico (Wortmann et al., 1998). En Asia, su adopción fue más lenta, pero hoy en día países como China e India son grandes productores (FAO, 2021).

4.1.2 Distribución actual

El frijol se cultiva en más de 150 países, siendo los principales productores:

- América: Brasil, México, Estados Unidos y Argentina.
- África: Uganda, Tanzania y Kenia.
- Asia: China, India y Myanmar.

Según la FAO (2021), la producción mundial supera los 30 millones de toneladas anuales, con Brasil como el mayor productor.

4.5 Importancia del frijol a nivel mundial

El frijol es una de las leguminosas más importantes en la alimentación humana, especialmente en países en desarrollo, debido a su alto contenido de proteínas (20-25%), fibra, vitaminas (como ácido fólico) y minerales (hierro y zinc) (Broughton et al., 2003). Además, contribuye a la seguridad alimentaria y a la economía agrícola en regiones de África, América Latina y Asia (FAO, 2020). Tanto por su valor nutricional como por su contribución a la seguridad alimentaria y al desarrollo agrícola. Perteneciente a la familia Fabaceae, es un cultivo fundamental en la dieta de millones de personas, especialmente en América Latina, África y Asia (FAO, 2020). Su versatilidad en la cocina, su capacidad de adaptación a diferentes climas y su aporte proteico lo convierten en un alimento estratégico para combatir la desnutrición y promover sistemas alimentarios sostenibles (Broughton et al., 2003).

4.6 Valor nutricional del frijol

El frijol es reconocido como una fuente esencial de proteínas, fibra, vitaminas y minerales. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), una porción de 100 gramos de frijoles cocidos proporciona aproximadamente:

- Proteínas: 8-10 g (ideal para dietas basadas en vegetales).
- Fibra dietética: 6-8 g (beneficiosa para la digestión y prevención de enfermedades crónicas).
- Hierro: 2-3 mg (importante para prevenir la anemia).
- Zinc y magnesio: esenciales para el sistema inmunológico y metabólico.

Además, los frijoles son bajos en grasas y contienen compuestos bioactivos como antioxidantes y polifenoles, que ayudan a reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y diabetes (Messina, 2014).

En muchos países en desarrollo, el frijol es un alimento básico que complementa dietas basadas en cereales como el maíz y el arroz. La FAO (2020) destaca que su cultivo es clave para la seguridad alimentaria debido a:

1. Accesibilidad económica: Es una fuente asequible de proteínas en comparación con carnes y lácteos.
2. Almacenamiento prolongado: Puede conservarse por largos períodos sin perder sus propiedades nutricionales.
3. Adaptabilidad climática: Se cultiva en diversas regiones, desde zonas tropicales hasta templadas.

En países como México, Brasil, India y Kenia, el frijol es parte fundamental de la dieta diaria, contribuyendo a reducir la inseguridad alimentaria (Beebe et al., 2013). A nivel mundial, el frijol es un cultivo de gran relevancia económica. Según datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2022), los principales productores incluyen:

1. Brasil (mayor productor de América Latina).
2. México (frijol negro y bayo son variedades clave).
3. India y China (importantes consumidores y productores).
4. Estados Unidos y Canadá (grandes exportadores).

El comercio internacional de frijol genera millones de dólares anuales, siendo un sustento para pequeños y medianos agricultores (Graham & Ranalli, 1997). Además, su cultivo mejora la fertilidad del suelo gracias a su capacidad de fijar nitrógeno, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos (Broughton et al., 2003). El consumo regular de frijoles está asociado con múltiples beneficios para la salud. Prevención de enfermedades crónicas, su alto contenido de fibra ayuda a regular el colesterol y la glucosa en sangre (Messina, 2014). Además combate a la desnutrición es una fuente clave de proteínas en regiones con limitado acceso a alimentos de origen animal. Organizaciones como la FAO y la OMS recomiendan incluir legumbres en dietas balanceadas para mejorar la nutrición global (WHO, 2018).

El frijol es un alimento indispensable a nivel mundial, tanto por su valor nutricional como por su impacto en la economía y la agricultura. Su consumo contribuye a la seguridad alimentaria, la salud pública y la sostenibilidad ambiental. Fomentar su producción y

consumo es esencial para enfrentar desafíos globales como la malnutrición y el cambio climático.

4.7 Importancia del frijol en México

En México, el frijol es un alimento básico en la dieta, tradicionalmente consumido junto con el maíz, formando una combinación nutricional completa (Aparicio-Saguilán et al., 2015). Es cultivado principalmente por pequeños agricultores y tiene un alto valor cultural y económico (SIAP, 2023). Es uno de los alimentos más importantes en la dieta de los mexicanos, no solo por su valor nutricional, sino también por su relevancia cultural, económica y agrícola. México es considerado uno de los centros de origen y diversificación de esta leguminosa, lo que ha permitido el desarrollo de múltiples variedades adaptadas a diferentes climas y suelos (Miranda-Colín, 2019).

El frijol es un alimento fundamental en la dieta mexicana debido a su alto contenido de proteínas, fibra, vitaminas y minerales. Según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2021), el frijol aporta entre el 20% y el 25% de las proteínas que consume la población de bajos recursos en México. Además, es una fuente importante de hierro, zinc, magnesio y ácido fólico, nutrientes esenciales para prevenir enfermedades como la anemia (Rosales-Serna & Acosta-Gallegos, 2020). En combinación con el maíz, el frijol forma una dieta equilibrada, ya que los aminoácidos que faltan en uno se complementan con el otro, proporcionando una proteína de alta calidad (Bressani, 2018). Esta combinación ha sido la base de la alimentación mexicana desde la época prehispánica y sigue siendo fundamental en la gastronomía actual.

México es uno de los principales productores y consumidores de frijol a nivel mundial. Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022), en 2021 se produjeron más de 1.2 millones de toneladas de frijol en el país, siendo los estados de Zacatecas, Durango y Chihuahua los principales productores. El cultivo de frijol es clave para la seguridad alimentaria, especialmente en zonas rurales donde es un alimento básico. Su capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas lo hace un cultivo resiliente ante sequías y suelos pobres (Guzmán-Maldonado et al., 2020). Además, al ser una

leguminosa, el frijol contribuye a la fertilidad del suelo mediante la fijación de nitrógeno, lo que beneficia a otros cultivos en sistemas de rotación (López-Salinas, 2019).

El frijol tiene un papel relevante en la economía mexicana, tanto para pequeños agricultores como para el mercado nacional e internacional. Según la SADER (2021), alrededor de 300,000 familias dependen directamente de su cultivo, especialmente en regiones con alta marginación. Aunque México es autosuficiente en la producción de frijol en algunos años, en ocasiones requiere importaciones para cubrir la demanda interna. Esto genera fluctuaciones en los precios, afectando tanto a productores como a consumidores (Hernández-Ramos et al., 2020). Sin embargo, el frijol sigue siendo un cultivo estratégico para el gobierno mexicano, que implementa programas de apoyo para su siembra y comercialización. El frijol está profundamente arraigado en la cultura mexicana. Desde la época prehispánica, formaba parte de la dieta básica de civilizaciones como los aztecas y mayas. Hoy en día, es un ingrediente esencial en platillos tradicionales como los frijoles refritos, la sopa tarasca, los enfrijoladas y los charros (Long-Solis & Vargas, 2019).

Además, el frijol tiene un simbolismo cultural en festividades y tradiciones. En algunas comunidades indígenas, se utiliza en ceremonias agrícolas como ofrenda para asegurar buenas cosechas (Toledo et al., 2021). Su presencia en la cocina mexicana ha sido reconocida por la UNESCO como parte del Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad, dentro de la denominación de la cocina tradicional mexicana (UNESCO, 2010).

A pesar de su importancia, el cultivo de frijol enfrenta desafíos como el cambio climático, plagas y enfermedades, así como la competencia con otros cultivos más rentables. La roya del frijol y la mosca blanca son algunas de las amenazas que reducen los rendimientos (López-Salinas, 2019). Para garantizar su sostenibilidad, se requieren políticas públicas que fomenten la investigación en variedades resistentes, técnicas de cultivo sustentable y apoyo a pequeños productores (Rosales-Serna & Acosta-Gallegos, 2020). Además, promover el consumo de frijol en las nuevas generaciones es clave para mantener su relevancia en la dieta mexicana. El frijol es un alimento indispensable en México por su valor nutricional, económico y cultural. Su producción sostiene a miles de familias y su consumo contribuye a la seguridad alimentaria del país. Preservar su cultivo y promover su consumo son acciones necesarias para mantener este legado cultural y alimenticio.

4.8 Producción de frijol en México

La producción de frijol en México se concentra en estados como Zacatecas, Durango, Chihuahua y Sinaloa, bajo condiciones de temporal y riego (SIAP, 2023). Sin embargo, enfrenta desafíos como sequías, plagas y suelos con problemas de salinidad (Peña-Cabriales & Castellanos, 2008). Es uno de los cultivos más importantes en México, tanto por su relevancia alimentaria como por su impacto económico y social. México es considerado uno de los centros de origen y diversificación de esta leguminosa, lo que ha permitido el desarrollo de múltiples variedades adaptadas a diferentes regiones (Miranda-Colín, 2019).

4.9 Regiones productoras de frijol en México

México cuenta con diversas zonas agroecológicas aptas para el cultivo de frijol, destacando principalmente los estados del norte, centro y sureste del país. Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), los principales estados productores son:

1. Zacatecas: Es el mayor productor nacional, contribuyendo con alrededor del 30% de la producción total. Sus condiciones climáticas semiáridas favorecen el cultivo de frijol en temporal (SAGARPA, 2021).
2. Durango y Chihuahua: Estas entidades destacan en la producción de frijol negro y pintor, especialmente en sistemas de riego (Guzmán-Maldonado et al., 2020).
3. Sinaloa y Nayarit: Producen principalmente en ciclos de riego, con variedades de alto rendimiento (Rosales-Serna & Acosta-Gallegos, 2020).
4. Puebla, Tlaxcala y Estado de México: En estas regiones se siembran variedades criollas en sistemas de temporal, asociadas con maíz (Hernández-Ramos et al., 2020).

4.10 Sistemas de producción de frijol

a) Temporal vs. Riego

La producción de frijol en México se divide en dos sistemas principales:

Temporal: Depende de las lluvias y representa alrededor del 70% de la producción nacional. Este sistema es predominante en zonas con alta marginación, donde los agricultores utilizan semillas criollas y técnicas tradicionales (López-Salinas, 2019).

Riego: Se concentra en regiones del norte (como Sinaloa y Chihuahua) y permite mayores rendimientos (1.5 a 2.5 ton/ha), aunque requiere mayor inversión en infraestructura (SIAP, 2023).

a) Asociación con Maíz (Milpa)

Un sistema tradicional en el centro y sur de México es la milpa, donde el frijol se siembra junto con maíz y calabaza. Este método mejora la fertilidad del suelo y reduce la incidencia de plagas (Toledo et al., 2021).

El rendimiento promedio nacional de frijol es de aproximadamente 0.7 a 1.2 toneladas por hectárea en temporal, mientras que en riego puede alcanzar hasta 3 toneladas (SIAP, 2023). Las variedades más cultivadas incluyen:

- Frijol negro (Negro Querétaro, Negro San Luis).
- Frijol pinto (Pinto Saltillo, Pinto Durango).
- Frijol flor de mayo y flor de junio (comunes en el centro del país).
- Frijol bayo (utilizado en guisados tradicionales).

Investigaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) han desarrollado variedades mejoradas con resistencia a sequías y enfermedades (Acosta-Gallegos et al., 2020). La sequía es uno de los principales problemas, especialmente en el norte del país. El cambio climático ha aumentado la irregularidad de las lluvias, afectando los ciclos de siembra (Hernández-Ramos et al., 2020). La roya del frijol (*Uromyces appendiculatus*) reduce rendimientos hasta en un 50% (López-Salinas, 2019).

La mosca blanca (*Bemisia tabaci*) transmite virus como el del mosaico dorado (Rosales-Serna & Acosta-Gallegos, 2020). Más de 300,000 familias dependen directamente del

cultivo de frijol, especialmente pequeños productores con parcelas menores a 5 hectáreas (SIAP, 2023). México es autosuficiente en años de buena producción, pero en sequías severas requiere importaciones de Estados Unidos y Canadá (Guzmán-Maldonado et al., 2020). El precio del frijol fluctúa debido a factores climáticos y especulación. El gobierno implementa programas de “compras de garantía” para estabilizar el mercado (Hernández-Ramos et al., 2020). El gobierno mexicano ha implementado estrategias para fortalecer la producción de frijol, como:

- Programa de Fertilizantes Gratuitos (para pequeños productores).
- Seguro Catastrófico (protección contra sequías).
- Investigación en semillas resistentes (INIFAP-CIMMYT).

La producción de frijol en México es clave para la seguridad alimentaria y la economía rural. Aunque enfrenta desafíos climáticos y de mercado, su cultivo sigue siendo fundamental para millones de mexicanos. Es necesario fortalecer políticas de apoyo a los productores, invertir en tecnología agrícola y promover el consumo interno para garantizar su sostenibilidad.

4.11 Estrés salino. Concepto

El estrés salino ocurre cuando las plantas están expuestas a altas concentraciones de sales en el suelo o en el agua de riego, lo que afecta su crecimiento y desarrollo (Munns & Tester, 2008). Este problema es común en zonas áridas y semiáridas, donde la evaporación favorece la acumulación de sales (Rengasamy, 2010). El estrés salino es uno de los principales factores abióticos que limitan el crecimiento y la productividad de las plantas, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la acumulación de sales en el suelo es un problema creciente (Munns & Tester, 2018). Se estima que más del 20% de las tierras cultivables a nivel mundial están afectadas por la salinidad, y este porcentaje aumenta debido al cambio climático y prácticas agrícolas inadecuadas (FAO, 2021). Este documento explora el concepto de estrés salino, sus efectos en las plantas, los mecanismos de tolerancia y las estrategias para mitigar su impacto en la agricultura. El estrés salino ocurre cuando la concentración de sales solubles en el suelo o en el agua de riego supera los niveles que las

plantas pueden tolerar, afectando su desarrollo fisiológico y bioquímico (Zhu, 2019). Las sales más comunes que causan este estrés son: Cloruro de sodio (NaCl), Sulfato de sodio (Na₂SO₄), Carbonato de sodio (Na₂CO₃), Cloruro de magnesio (MgCl₂).

Este fenómeno puede ser de dos tipos:

Salinización primaria: Ocurre de forma natural por procesos geológicos y climáticos, como la erosión de rocas ricas en sales o la intrusión marina en acuíferos costeros (Shrivastava & Kumar, 2020).

Salinización secundaria: Es causada por actividades humanas, como el riego con aguas salinas, el uso excesivo de fertilizantes y la deforestación (FAO, 2021).

4.12 Efectos del estrés salino en las plantas

4.12.1 Efectos a nivel fisiológico

Déficit hídrico (estrés osmótico): Las sales reducen el potencial hídrico del suelo, dificultando la absorción de agua por las raíces (Munns & Tester, 2018). Toxicidad iónica la acumulación de iones como Na⁺ y Cl⁻ en los tejidos vegetales interfiere con procesos metabólicos esenciales (Zhu, 2019). Desequilibrio nutricional: El exceso de Na⁺ compite con la absorción de nutrientes como K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺, esenciales para el crecimiento (Hasegawa et al., 2020).

4.12.2 Efectos a nivel bioquímico y molecular

Estrés oxidativo: Las sales promueven la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), que dañan membranas celulares, proteínas y ADN (Gupta & Huang, 2021). Alteración en la fotosíntesis: La salinidad reduce la actividad de la Rubisco (enzima clave en la fijación de CO₂) y provoca el cierre estomático, disminuyendo la eficiencia fotosintética (Chaves et al., 2019). Cambios en la expresión génica Las plantas activan genes relacionados con la síntesis de osmoprotectores (como prolina y glicina betaína) para contrarrestar el estrés (Deinlein et al., 2020).

4.13 Mecanismos de tolerancia al estrés salino

Las plantas han desarrollado estrategias para adaptarse a condiciones salinas, clasificadas en tres categorías principales:

Exclusión de Sales

Algunas plantas evitan la absorción excesiva de Na mediante bombas de protones (como la H-ATPasa) que expulsan iones tóxicos (Munns & Tester, 2018). Otras acumulan sales en raíces o hojas viejas para proteger tejidos jóvenes (Zhu, 2019).

4.13.1 Tolerancia osmótica

Síntesis de osmolitos compatibles (prolina, glicina betaína, azúcares) que mantienen el equilibrio hídrico celular (Gupta & Huang, 2021). Acumulación de iones K para contrarrestar el efecto tóxico del Na (Hasegawa et al., 2020).

4.13.2 Tolerancia al estrés oxidativo

Producción de enzimas antioxidantes (superóxido dismutasa, catalasa, peroxidasas) que neutralizan ROS (Chaves et al., 2019).

Mejoramiento Genético desarrollo de variedades tolerantes mediante selección asistida por marcadores moleculares (Deinlein et al., 2020). Uso de técnicas de edición génica (CRISPR/Cas9) para modificar genes relacionados con la tolerancia a salinidad (Zhu, 2019).

4.14 Prácticas agronómicas

Lixiviación de sales: Aplicación de riego en exceso para lavar sales del suelo (FAO, 2021).

Uso de biofertilizantes: Microorganismos como *Azospirillum* mejoran la absorción de nutrientes en suelos salinos (Shrivastava & Kumar, 2020).

El estrés salino es un problema crítico para la agricultura global, afectando la productividad de cultivos y la seguridad alimentaria. Comprender sus mecanismos y desarrollar estrategias de mitigación es esencial para garantizar la sostenibilidad agrícola en zonas afectadas. La combinación de mejoramiento genético, prácticas agronómicas innovadoras y biotecnología ofrece soluciones prometedoras para enfrentar este desafío.

4.15 Clasificación de las plantas en función de la salinidad

La salinidad es uno de los principales factores abióticos que limitan la productividad agrícola, afectando aproximadamente al 20% de las tierras cultivables a nivel mundial (FAO, 2021). Las plantas han desarrollado diferentes estrategias para adaptarse a condiciones salinas, lo que permite clasificarlas en función de su capacidad para tolerar altas concentraciones de sales en el suelo. Esta clasificación es fundamental para la selección de cultivos en zonas afectadas y para el desarrollo de estrategias de manejo agrícola sostenible (Munns & Tester, 2018).

4.15.1 Plantas glicófitas (Sensibles a la Salinidad)

Especies que no toleran concentraciones elevadas de sal ($CE_e < 4$ dS/m).

Muestran clorosis, necrosis foliar y reducción del crecimiento bajo estrés salino (Zhu, 2016). Carecen de mecanismos eficientes para excluir o compartimentalizar sales.

Ejemplos: Maíz (*Zea mays*) (umbral: 1.7 dS/m) (Maas & Hoffman, 1977). Frijol (*Phaseolus vulgaris*) (umbral: 1.0 dS/m) (Shannon & Grieve, 1999). Arroz (*Oryza sativa*) (umbral: 3.0 dS/m) (Ismail & Horie, 2017).

4.15.2 Plantas moderadamente tolerantes

Especies que pueden crecer en suelos con CE entre 4 y 8 dS/m. Presentan mecanismos de exclusión iónica y ajuste osmótico, pueden sufrir reducción de rendimiento en condiciones salinas extremas.

Ejemplos: Trigo (*Triticum aestivum*) (umbral: 6.0 dS/m) (Munns et al., 2020). Algodón (*Gossypium hirsutum*) (umbral: 7.7 dS/m) (Ashraf & Harris, 2019). Tomate (*Solanum lycopersicum*) (umbral: 5.0 dS/m) (Cuartero et al., 2021).

4.15.3 Plantas tolerantes (halófitas facultativas)

Especies que toleran CE entre 8 y 16 dS/m y pueden crecer en suelos salinos y no salinos.

Compartimentalización de Na en vacuolas. Síntesis de antioxidantes para mitigar el estrés oxidativo (Flowers & Colmer, 2019).

Ejemplos:

Cebada (*Hordeum vulgare*) (umbral: 8.0 dS/m) (Munns & Tester, 2018). Remolacha azucarera (*Beta vulgaris*) (umbral: 15 dS/m) (Koyro et al., 2020). Espinaca (*Spinacia oleracea*) (umbral: 10 dS/m) (Shabala, 2019).

4.15.4 Plantas halófitas obligatorias (Altamente tolerantes)

Especies que requieren salinidad para su crecimiento óptimo (CE > 16 dS/m).

Acumulación de sales en tejidos especializados (glándulas de sal). Metabolismo adaptado a altas concentraciones de NaCl (Flowers et al., 2020).

Ejemplos:

Mangle (*Avicennia germinans*) (crece en agua marina, CE: 50 dS/m) (Ball, 2018). Hierba salada (*Salicornia europaea*) (tolerancia hasta 60 dS/m) (Ventura et al., 2021). Spartina (*Spartina alterniflora*) (halófito de marismas) (Pennings & Bertness, 2019).

La clasificación de plantas según su tolerancia a la salinidad es esencial para optimizar la agricultura en zonas afectadas. Mientras las glicófitas son ideales para suelos no salinos, las halófitas representan una alternativa sostenible para suelos degradados. Futuras investigaciones en fisiología vegetal y biotecnología permitirán desarrollar cultivos más resistentes, contribuyendo a la seguridad alimentaria global.

4.16 Efecto del estrés salino en el crecimiento de las plantas

La salinidad reduce la absorción de agua (efecto osmótico) y causa toxicidad por iones como Na y Cl, lo que inhibe el crecimiento radicular y reduce la biomasa (Munns, 2005). En el frijol, esto se traduce en menor rendimiento y calidad del grano (Bayuelo-Jiménez et al., 2002). El estrés salino es uno de los principales factores abióticos que limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas, afectando significativamente la productividad agrícola a nivel mundial (Munns & Tester, 2018). Se estima que más del 20% de las tierras cultivables y aproximadamente el 50% de las tierras de regadío presentan problemas de salinidad, lo que representa un grave desafío para la seguridad alimentaria (FAO, 2021). Este documento examina en profundidad los efectos del estrés salino en el crecimiento vegetal, analizando

sus impactos a nivel morfológico, fisiológico y bioquímico, así como los mecanismos de adaptación que desarrollan las plantas para sobrevivir en estas condiciones adversas

El estrés salino ocurre cuando las plantas están expuestas a altas concentraciones de sales solubles en la zona radicular, principalmente cloruro de sodio (NaCl), sulfato de sodio (Na₂SO₄) y carbonatos (Isayenkov & Maathuis, 2019). Según Zhu (2016), este fenómeno puede clasificarse en: Salinidad primaria: Originada por procesos naturales como la meteorización de rocas, deposición atmosférica de sales marinas o ascenso capilar de aguas subterráneas salinas. Salinidad secundaria: Resultado de actividades antropogénicas como riego con aguas salobres, uso excesivo de fertilizantes y malas prácticas de drenaje (Shrivastava & Kumar, 2015). La fase de germinación es particularmente sensible a la salinidad. Altas concentraciones de sales pueden: Reducir la absorción de agua debido al efecto osmótico (imbibición inhibida), causar toxicidad iónica en embriones y tejidos de reserva, alterar la actividad enzimática necesaria para la movilización de reservas (Hasegawa, 2013) Estudios en trigo muestran reducciones del 40-60% en la germinación con concentraciones de 100 mM NaCl (Rasheed et al., 2018).

Las raíces son los primeros órganos en percibir el estrés salino, mostrando:

Inhibición del crecimiento longitudinal, reducción en la ramificación secundaria, engrosamiento de paredes celulares en la endodermis, cambios en la arquitectura radical (disminución de la relación longitud/volumen) (Julkowska & Testerink, 2015). El estrés salino representa uno de los mayores desafíos para la agricultura moderna, afectando múltiples aspectos del crecimiento y desarrollo vegetal. La comprensión integral de sus efectos a diferentes niveles de organización biológica permite el desarrollo de estrategias efectivas para mitigar su impacto. La combinación de enfoques genéticos, fisiológicos y agronómicos ofrece perspectivas prometedoras para mantener la productividad agrícola en condiciones de salinidad.

4.16.1 Efecto del estrés salino en la fotosíntesis

El exceso de sales afecta la fotosíntesis al dañar los cloroplastos, reducir la clorofila y cerrar estomas, limitando el intercambio de CO₂ (Chaves et al., 2009). Además, altera la actividad enzimática del ciclo de Calvin, disminuyendo la eficiencia fotosintética

(Parida & Das,

2005). El estrés salino es uno de los principales factores abióticos que limitan la productividad agrícola, afectando procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis (Munns & Tester, 2008). La acumulación excesiva de sales en el suelo, particularmente NaCl, altera el metabolismo vegetal, reduciendo la eficiencia fotosintética y, en consecuencia, el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Chaves et al., 2009). Este documento examina los mecanismos por los cuales la salinidad afecta la fotosíntesis, incluyendo alteraciones en la captación de CO₂, la eficiencia del fotosistema II (PSII), la producción de clorofila y la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Además, se discuten estrategias de mitigación basadas en mejoramiento genético y manejo agronómico.

4.16.2 Reducción en la Captación de CO₂

El estrés salino induce cierre estomático como mecanismo de conservación de agua, lo que limita la entrada de CO₂ necesario para la fase bioquímica de la fotosíntesis (Flexas et al., 2007). Además, la acumulación de iones Na⁺ y Cl⁻ en los cloroplastos interfiere con la actividad de la enzima Rubisco, crucial para la fijación de carbono en el ciclo de Calvin (Parida & Das, 2005).

4.16.3 Daño al fotosistema II (PSII)

El PSII es particularmente sensible al estrés salino, mostrando reducción en la eficiencia cuántica (Fv/Fm): Indicador de estrés fotoquímico (Baker, 2008). Inhibición de la síntesis de D1: Proteína esencial para la reparación del PSII (Allakhverdiev et al., 2002).

Desacoplamiento de los complejos de antena: Disminuye la captación de luz (Kalaji et al., 2016). La salinidad reduce la síntesis de clorofila a y b, debido a la Inhibición de la enzima δ -aminolevulinato deshidratasa (ALAD) (Santos, 2004). Peroxidación lipídica por estrés oxidativo (Hernández et al., 2000).

El estrés salino afecta la fotosíntesis mediante múltiples mecanismos, desde el cierre estomático hasta el daño al PSII. Sin embargo, plantas adaptadas emplean estrategias como la síntesis de osmolitos y la activación de antioxidantes para mantener la actividad fotosintética. La combinación de mejoramiento genético, bioestimulantes y prácticas de manejo puede mitigar estos efectos, asegurando la productividad en suelos salinos.

4.17 Distribución de suelos salinos en Chiapas y su impacto en la productividad del frijol

Chiapas es uno de los estados con mayor diversidad agrícola en México, donde el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) representa un componente esencial para la seguridad alimentaria y la economía rural (SIAP, 2023). Sin embargo, la salinización de los suelos es un problema creciente que limita la productividad de este cultivo, especialmente en zonas con riego deficiente o alta evaporación (Peña-Cabriaes & Castellanos, 2008). Este fenómeno afecta aproximadamente el 20% de las tierras cultivables a nivel mundial (FAO, 2021), y Chiapas no es la excepción.

4.17 Distribución de suelos salinos en Chiapas

La salinidad en Chiapas puede ser de dos tipos:

Salinización primaria: Ocurre naturalmente por la erosión de rocas ricas en sales o la intrusión marina en zonas costeras (Shrivastava & Kumar, 2020).

Salinización secundaria: Resultado de actividades humanas, como el riego con aguas salobres, el uso excesivo de fertilizantes y la deforestación (FAO, 2021).

4.17.1 Principales zonas afectadas

Según estudios del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), las regiones con mayor riesgo de salinización en Chiapas incluyen:

- La Frailesca (Villaflores, Villa Corzo): Suelos arcillosos con baja permeabilidad y acumulación de sales por riego inadecuado (López-Salinas, 2019).
- Costa y Soconusco: Intrusión salina en acuíferos cercanos al Océano Pacífico (Rengasamy, 2010).

- Valles Centrales (Tuxtla Gutiérrez, Chiapa de Corzo): Uso intensivo de fertilizantes nitrogenados que aumentan la conductividad eléctrica del suelo (Munns & Tester, 2008).

Tabla 1. Concentración de sales en suelos de Chiapas (datos promedio)

Región	CE (dS/m)	Tipo de salinidad	Cultivos afectados
La Frailesca	4.2	Secundaria	Frijol, maíz
Costa	6.8	Primaria/Secundaria	Coco, mango
Valles Centrales	3.5	Secundaria	Hortalizas, frijol

Nota: CE = Conductividad eléctrica (umbral crítico para frijol: >1.0 dS/m; Shannon & Grieve, 1999).

4.18 Alteraciones fisiológicas

Fotosíntesis: La salinidad reduce la eficiencia del fotosistema II (Fv/Fm) en un 3.6% y la concentración de clorofilas en un 33% (Parida & Das, 2005).

Balance hídrico: El contenido relativo de agua (CRA) disminuye del 85% al 72%, limitando la transpiración (Flexas et al., 2007).

4.19 Mejoramiento genético

Selección de variedades tolerantes: El INIFAP ha desarrollado líneas de frijol con mayor resistencia a sales, como "Negro Comapa" (Acosta-Gallegos et al., 2020).

Edición génica (CRISPR/Cas9): Enfoque prometedor para modular genes de exclusión de Na (Zhu, 2019).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5,1 Establecimiento del experimento

El experimento se desarrolló en el invernadero de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), municipio de Villa Corzo Chiapas (Figura 1), en los meses de septiembre a octubre de 2023. Se seleccionaron semillas de frijol variedad Sangre Maya, provenientes de la zona, con más de 90 % de germinación.



Figura 1 Ubicación del área experimental.

Se sembraron tres semillas por recipiente, dejando una planta por macetas de un litro de volumen de capacidad para los muestreos posteriores y se utilizó un sustrato compuesto con tierra de vega, arena y peat moss. Se establecieron dos tratamientos, control y estrés salino. Se regó a capacidad de campo cada día para mantener la humedad de germinación. Cuando las plantas emitieron la tercera hoja trifoliada se sometieron a un tratamiento de estrés salino a través de las siguientes concentraciones de NaCl: 0 mM de NaCl y 200 mM de NaCl. Para evitar el choque osmótico, la solución salina (200 mM de NaCl) se aplicó progresivamente en el agua de riego cada dos días a razón de 50 mM, 100 mM, 150 mM y 200 mM de NaCl. Completada la solución final se regó a capacidad de campo. Se utilizó un diseño completamente al azar con 15 repeticiones.

5.2 Procedimiento para el cálculo de las concentraciones salinas

Se usó el reactivo de Cloruro de Sodio hidratado (NaCl) con peso molecular de 58.443 g L⁻¹. Se procedió a pesar 58.443 mg de NaCl para lograr la solución 1 molar. Si pesaron 0.058443 g y se diluyó en un litro de agua destilada obteniendo una solución 1 mM, de manera que para lograr el resto de las soluciones se tuvo que pesar las cantidades que se muestran en la siguiente tabla, las cuales se diluyeron en un litro de agua destilada.

Tabla 1. Procedimiento para el cálculo de las concentraciones salinas

Concentraciones (mM)	Cantidad a pesar (g)
50	2.922
100	5.844
150	8.766
200	11.689

Aunque se usó la concentración de 200 mM de NaCl, se calcularon todas las soluciones para establecer el tratamiento de estrés salino progresivamente y evitar el choque osmótico en las plantas. El primer día del establecimiento del estrés salino se aplicó un riego con una solución de NaCl a una concentración de 50 mM y así sucesivamente hasta lograr completar el tratamiento con la solución de NaCl a 200 mM.

5.3 Medición del crecimiento de las plantas

Se realizó un muestreo destructivo de 8 plantas por tratamientos durante la fase fonológica R8 (llenado de las vainas). En cada planta se determinaron las siguientes variables: Masa seca de raíz, tallo y hojas. Se separaron las plantas en hoja, tallo y raíz y se colocaron en una estufa durante 72 horas a 80 °C o hasta peso constante. Previamente se midieron, la altura de la planta, área foliar y longitud de la raíz.

5.3.1 Índices de crecimiento

Con los datos de masa seca de la planta (masa seca de raíz + tallo + hojas) se calcularon, longitud específica de la raíz, número de hojas, diámetro de tallo, altura de la planta y razón de área foliar.

5.3.2 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 MC-100 tomando dos lecturas de las hojas de la parte media de las plantas a las 08:00 horas. La fluorescencia de la clorofila se determinó con un fluorómetro tomando una lectura de una hoja de cada planta de la parte media de ocho plantas por tratamientos, a las 08:00 horas.

5.4 Indicadores del régimen hídrico de la planta

Para conocer el estatus hídrico de las plantas se determinaron los siguientes indicadores:

5.4.1 Contenido Relativo de Agua (CRA, %)

Se tomaron ocho discos foliares y se determinó el peso fresco (g), peso turgente (PT) y el peso seco (PS) a las 09:00 horas. El CRA se calculó usando la siguiente fórmula:

$$\text{CRA (\%)} = (\text{PF} - \text{PS}) / (\text{PT} - \text{PS}) * 100$$

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)

El peso turgente se logró sumergiendo los discos foliares en agua destilada hasta que las células se encontraran turgentes. Esto se pudo comprobar a través de pesajes sucesivos.

5.4.2 Transpiración

Se separaron ocho folíolos por tratamientos los cuales se pesaron para determinar el peso fresco (PF inicial). Pasados 15 minutos se volvieron a pesar para determinar el peso fresco (PF final). Las hojas se colocaron en una estufa durante 72 horas a 80 °C para determinar el peso seco (PS). Se asumió la pérdida de peso a la transpiración y se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Transpiración [mg (H}_2\text{O) g (PS)}^{-1}\text{min}^{-1}] = (\text{PFI-PFf}) / (\text{PS} / (15 \text{ min}))$$

Donde:

PS: peso seco de la hoja (foliolo)

PFI: Peso seco inicial de los folíolos

PFf: Peso seco final de los folíolos

5.5 Análisis estadísticos

Los datos se sometieron a una prueba de T de Student, considerando la variedad Sangre Maya, en control y con estrés salino. La comparación de medias se realizará a través de la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estrés salino redujo significativamente el crecimiento vegetativo de las plantas de frijol. La altura disminuyó de forma marcada en comparación con el control (Tabla 1), lo que indica una limitación sostenida en la expansión celular. El crecimiento del tallo depende directamente del mantenimiento de la turgencia; bajo condiciones salinas, la disminución del potencial osmótico del medio reduce el gradiente hídrico suelo-raíz, afectando la absorción de agua y, en consecuencia, la presión de turgencia necesaria para el crecimiento (Munns & Tester, 2008). La reducción significativa en el número de hojas por planta (Tabla 1) refuerza esta interpretación, ya que el desarrollo foliar es altamente sensible al estado hídrico y al balance fuente-sumidero.

Tabla 1. Efecto del estrés salino en el crecimiento, floración y formación de vainas de plantas de frijol

Variables	Control	Estrés salino	T de Student	p
Altura planta (cm)	79.75± 13.44	49.38±13.05	4.59	0.0004
Longitud de la raíz (cm)	19.44±2.26	21.88±3.91	-1.53	0.1489
Diámetro del tallo (mm)	4.86±0.39	4.84±0.35	0.14	0.8896
Hojas por planta	9.00±1.07	6.88±1.25	3.66	0.0026
Flores por planta	5.38±2.33	2.75±1.58	2.64	0.0194
Vainas por planta	6.50±2.14	5.13±2.23	1.26	0.2289

El diámetro del tallo no mostró diferencias significativas (Tabla 1), lo que sugiere que los procesos de crecimiento radial fueron menos sensibles que el crecimiento longitudinal. Este patrón ha sido descrito en especies moderadamente sensibles a salinidad, donde la limitación primaria ocurre a nivel de expansión celular antes que en la diferenciación de tejidos vasculares (Zhu, 2001). En el componente reproductivo, el número de flores disminuyó significativamente en el tratamiento con estrés salino (Tabla 1). La floración es un proceso dependiente del suministro continuo de fotoasimilados; cuando la asimilación de carbono se restringe por cierre estomático y menor eficiencia fotosintética, la iniciación floral puede verse afectada (Chaves et al., 2009). Aunque el número de vainas no presentó diferencias estadísticas (Tabla 1), la reducción en flores implica una disminución del potencial reproductivo máximo.

La masa seca total disminuyó significativamente bajo salinidad, con reducciones claras en hojas y tallos (Tabla 2). Esta pérdida de biomasa refleja una disminución en la asimilación neta de carbono y un aumento en los costos metabólicos asociados al mantenimiento de la homeostasis iónica. Bajo estrés salino, las plantas deben invertir energía en exclusión o compartimentalización de Na^+ y Cl^- , así como en la síntesis de osmólitos compatibles, lo que reduce el carbono disponible para crecimiento estructural (Munns & Tester, 2008).

Aunque la masa seca radicular disminuyó marginalmente ($p=0.05$), la fracción de masa radicular aumentó (Tabla 2), indicando un cambio en la partición de biomasa. Este ajuste sugiere una priorización relativa del sistema radical frente al componente aéreo. Además, la longitud específica de la raíz aumentó significativamente (Tabla 2), lo que indica mayor longitud por unidad de biomasa invertida. Este parámetro refleja una modificación en la arquitectura radical hacia raíces más finas o con mayor capacidad exploratoria. Tal ajuste puede interpretarse como una estrategia para incrementar la superficie de absorción en un medio osmóticamente restrictivo, aunque no compensó la reducción general en biomasa total.

Tabla 2. Efecto del estrés salino en la asignación de biomasa de plantas de frijol

Variables	Control	Estrés salino	T de Student	P
Masa seca de hojas (g)	2.69±0.40	1.53±0.22	7.14	0.00
Masa seca de tallo (g)	1.62±0.50	0.92±0.13	3.81	0.00
Masa seca de raíz (g)	0.57±0.18	0.42±0.08	2.11	0.05
Masa seca de la planta (g)	4.88±0.74	2.88±0.18	7.38	0.00
Fracción de masa foliar	0.56±0.07	0.53±0.06	0.79	0.44
Fracción de masa radicular	0.12±0.03	0.15±0.03	-2.11	0.05
Longitud específica de la raíz (cm g^{-1})	37.21±11.29	52.66±11.24	-2.74	0.02

En cuanto a la actividad del fotosistema II, el análisis de fluorescencia reveló alteraciones en el funcionamiento del fotosistema II. La fluorescencia inicial (F_0) no mostró diferencias significativas (Tabla 3), lo que indica que no hubo un incremento en la inactivación estructural irreversible de centros de reacción. En contraste, la fluorescencia máxima (F_m) y la fluorescencia variable (F_v) disminuyeron significativamente bajo estrés (Tabla 3), lo que

refleja una menor capacidad de reducción del aceptor primario de electrones y una limitación en la eficiencia fotoquímica global.

Tabla 3. Efecto del estrés salino en el funcionamiento del fotosistema II de plantas de frijol.

Variables	Control	Estrés salino	T de Student	p
Fluorescencia inicial (F0)	319.63±19.61	314.25±17.73	0.58	0.57
Fluorescencia máxima (Fm)	1851.25±62.77	1552.75±130.33	5.84	0.00
Fluorescencia variable (Fv)	1531.63±44.88	1238.50±118.95	6.52	0.00
Producto cuántico máximo de la fotoquímica primaria (Fv/Fm)	0.83±0.01	0.80±0.01	6.15	0.00
Índice de potencial fotosintético (Piabs)	8.92±1.27	6.67±1.23	3.60	0.00
Energía absorbida por centro de reacción (ABS/RC)	1.54±0.06	1.69±0.07	-4.37	0.00
Energía atrapada por centro de reacción (TRo/RC)	1.27±0.05	1.34±0.05	-2.84	0.01
Transporte de electrones por centro de reacción (ETo/RC)	4.91±0.39	5.07±0.19	-1.06	0.31
Probabilidad con la que un excitón atrapado puede mover un electrón después de QA (ETo/TrO)	3.85±0.28	3.78±0.24	0.51	0.62

El cociente Fv/Fm disminuyó significativamente (Tabla 3), evidenciando una reducción en el rendimiento cuántico máximo del fotosistema II. Este parámetro es ampliamente utilizado como indicador de fotoinhibición (Maxwell & Johnson, 2000). Aunque los valores no descendieron a niveles asociados con daño irreversible severo, la reducción observada indica que el aparato fotosintético operó bajo mayor presión energética. El índice de desempeño fotosintético (PIabs) también disminuyó bajo estrés salino (Tabla 3). Este índice integra densidad de centros activos, eficiencia de atrapamiento y probabilidad de transporte electrónico (Strasser et al., 2004), por lo que su reducción refleja una afectación funcional más amplia que la indicada por Fv/Fm. De manera consistente, los valores de energía absorbida por centro de reacción (ABS/RC) y energía atrapada por centro de reacción (TRo/RC) aumentaron (Tabla 3). Este patrón sugiere que la energía incidente se distribuyó entre un menor número efectivo de centros activos, incrementando la carga energética por centro funcional. Cuando la utilización de energía en el ciclo de Calvin se ve limitada por restricción estomática, este desbalance favorece la acumulación de energía en el aparato

fotosintético y aumenta el riesgo de formación de especies reactivas de oxígeno (Parida & Das, 2005). El transporte de electrones por centro de reacción (ETo/RC) y la probabilidad de transporte electrónico no mostraron diferencias significativas (Tabla 3), lo que indica que los centros remanentes conservaron su eficiencia relativa. La limitación parece estar asociada más a la reducción en la fracción de centros activos o a restricciones metabólicas aguas abajo del fotosistema II que a una pérdida completa de funcionalidad intrínseca de cada centro. La disminución en la transpiración y en el contenido relativo de agua observada en la Figura 1 confirma la presencia de un componente osmótico relevante.

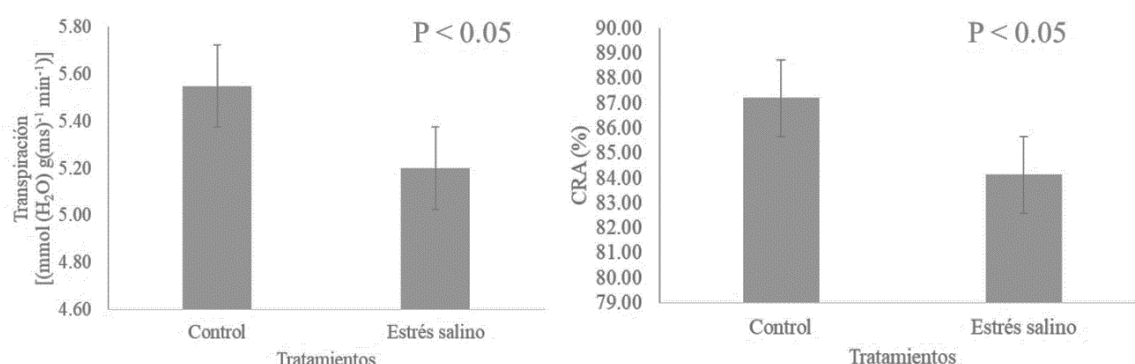


Figura 1. Efecto del estrés salino en la transpiración y el contenido relativo de agua de plantas de frijol.

La reducción del estado hídrico tisular induce cierre estomático y limita la difusión de CO₂ hacia el mesófilo, lo que reduce la asimilación de carbono (Chaves et al., 2009). Este acoplamiento entre estado hídrico y desempeño fotoquímico explica la disminución simultánea en biomasa (Tabla 2) y en eficiencia del fotosistema II (Tabla 3).

La concentración de clorofilas totales (Cl a+b) disminuyó bajo estrés salino (Figura 2). La reducción de pigmentos puede asociarse a degradación inducida por estrés oxidativo o a limitaciones en su biosíntesis. Una menor concentración de clorofilas reduce la capacidad de absorción de luz y puede constituir un ajuste frente a la menor capacidad de utilización de energía fotoquímica.

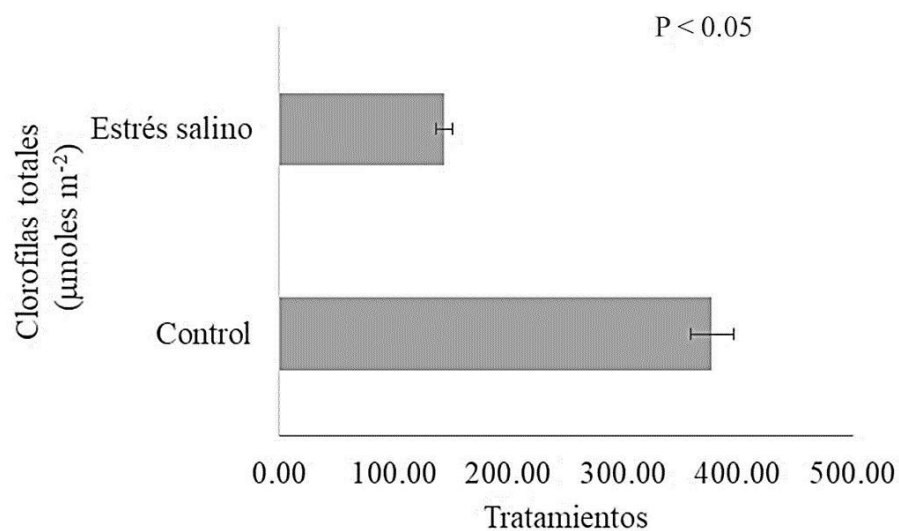


Figura 2. Efecto del estrés salino en la concentración de clorofilas totales de plantas de frijol.

En conjunto, los resultados muestran un patrón integrado: el estrés salino redujo el estado hídrico, limitó la eficiencia fotoquímica y disminuyó la acumulación de biomasa. La modificación en la arquitectura radical indica un ajuste morfológico frente a la restricción osmótica, pero este no fue suficiente para mantener el crecimiento ni la expresión reproductiva al nivel del tratamiento control.

VII CONCLUSIONES

El estrés salino afectó de manera significativa el crecimiento, la asignación de biomasa, el funcionamiento del fotosistema II y el estado hídrico de las plantas de frijol. La reducción en la eficiencia fotoquímica y en la asimilación de carbono explica la disminución en biomasa aérea y en floración. Aunque se observaron ajustes en la partición hacia el sistema radical y en la arquitectura de la raíz, estos no compensaron la limitación impuesta por la salinidad. Los resultados confirman que la salinidad actúa simultáneamente como estrés osmótico y como factor que compromete el equilibrio energético del aparato fotosintético, afectando tanto la estructura como el funcionamiento integral de la planta.

VIII BIBLIOGRAFÍA

- Allakhverdiev, S. I., Sakamoto, A., Nishiyama, Y., Inaba, M., & Murata, N. (2002). Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant Physiology*, 123(3), 1047-1056.
- Aparicio-Saguilán, A., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. A. (2015). El frijol como alimento funcional. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(3), 567-576.
- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.
- Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2004). Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, 166(1), 3-16.
- Bayuelo-Jiménez, J. S., Craig, R., & Lynch, J. P. (2002). Salinity tolerance of *Phaseolus* species during germination and early seedling growth. *Crop Science*, 42(5), 1584-1594.
- Beebe, S., Rengifo, J., Gaitán, E., Duque, M. C., & Tohme, J. (2001). Diversity and origin of Andean landraces of common bean. *Crop Science*, 41(3), 854-862.
- Berglund-Brücher, O., & Brücher, H. (1976). The South American wild bean (*Phaseolus aborigineus* Burk.) as ancestor of the common bean. *Economic Botany*, 30(3), 257-272.
- Bitocchi, E., Nanni, L., Bellucci, E., Rossi, M., Giardini, A., Zeuli, P. S., ... & 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.
- Blumwald, E. (2000). Sodium transport and salt tolerance in plants. *Current Opinion in Cell Biology*, 12(4), 431-434.
- 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.
- 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.

- Debouck, D. G., Toro, O., Paredes, O. M., Johnson, W. C., & Gepts, P. (1993). Genetic diversity and ecological distribution of *Phaseolus vulgaris* in northwestern South America. *Economic Botany*, 47(4), 408-423.
- FAO. (2020). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2021). Global map of salt-affected soils. <https://www.fao.org>
- Flexas, J., Diaz-Espejo, A., Galmés, J., Kaldenhoff, R., Medrano, H., & Ribas-Carbó, M. (2007). Rapid variations of mesophyll conductance in response to changes in CO₂ concentration around leaves. *Plant, Cell & Environment*, 30(10), 1284-1298.
- Flexas, J., Diaz-Espejo, A., Galmés, J., Kaldenhoff, R., Medrano, H., & Ribas-Carbó, M. (2007). Rapid variations of mesophyll conductance in response to changes in CO₂ concentration around leaves. *Plant, Cell & Environment*, 30(10), 1284-1298.
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2015). Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 327-331.
- Gepts, P., & Debouck, D. (1991). Origin, domestication, and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In A. van Schoonhoven & O. Voysest (Eds.), *Common beans: Research for crop improvement* (pp. 7-53). CAB International.
- González, L. M. (2001). Efecto de la salinidad en las relaciones hídricas de las plantas. *Revista de Investigaciones Agrícolas*, 15(2), 45-56.
- Kaplan, L., & Lynch, T. F. (1999). *Phaseolus* (Fabaceae) in archaeology: AMS radiocarbon dates and their significance for pre-Columbian agriculture. *Economic Botany*, 53(3), 261-272.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668.
- Morales, F., Abadía, A., & Abadía, J. (2010). Photosynthetic responses of plants to salinity. *Photosynthetica*, 48(4), 511-520.
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645-663.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324–349.
- Peña-Cabriaes, J. J., & Castellanos, J. Z. (2008). El cultivo del frijol en México. Colegio de Postgraduados.
- Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), 613-620.
- Schmutz, J., McClean, P. E., Mamidi, S., Wu, G. A., Cannon, S. B., Grimwood, J., ... & Jackson, S. A. (2014). A reference genome for common bean and genome-wide analysis of dual domestications. *Nature Genetics*, 46(7), 707-713.
- SIAP. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Evidencias arqueológicas, como restos de frijoles encontrados en cuevas de Tehuacán (México) y Guitarrero (Perú), respaldan estas fechas (Kaplan & Lynch, 1999).
- Smartt, J. (1989). Evolution of grain legumes. I. Mediterranean pulses. *Experimental Agriculture*, 25(2), 139-154.
- Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis* (pp. 321–362). Springer.
- Wortmann, C. S., Kirkby, R. A., Eledu, C. A., & Allen, D. J. (1998). Atlas of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in Africa. CIAT.
- Zhu, J.-K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), 66–71.