



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**Respuesta de dos cultivares de haba (*Vicia faba* L.)
bajo diferente potencial osmótico en hidroponía**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
RECURSOS NATURALES

PRESENTA

JOSÉ DAVID VARELA GONZÁLEZ

COMITÉ DE TUTORES:

DIRECTORA: DRA. DELFINA DE JESÚS PÉREZ LÓPEZ

CODIRECTOR: DR. ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA

TUTOR ADJUNTO: DR. JOSÉ FRANCISCO RAMÍREZ DÁVILA

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, Noviembre 2025.

ÍNDICE

Pág.

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN GENERAL	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. HIPÓTESIS	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Origen	5
2.2 Importancia	6
2.3 Producción mundial	7
2.4 Importancia en México	7
2.5 Limitaciones del cultivo	8
2.6 Hidroponía	9
2.6.1 Definición	9
2.6.2 Historia	9
2.6.3 La solución nutritiva	10
2.6.4 Solución Arnon-Hoagland	11
2.6.5 Solución Steiner	12
2.6.6 Concentración total de iones	13
2.6.7 pH	13
2.6.8 Relación mutua entre aniones y cationes	14
2.6.9 Potencial osmótico	15
2.7 Nitrato y Amonio	16
2.8 Importancia de la hidroponía como herramienta en la investigación	17

2.9	Potencial osmótico en el cultivo de haba	17
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1	Ubicación.....	19
3.2	Material vegetal	19
3.3	Diseño experimental.....	19
3.4	Diseño de tratamientos	20
3.5	Establecimiento del experimento	21
3.5.1	Fechas de siembra.....	21
3.5.2	Siembra.....	21
3.5.3	Preparación y esterilización del sustrato	21
3.5.4	Trasplante	22
3.5.6	Tratamientos de fertilización	23
3.5.7	Formulación y preparación de las soluciones nutritivas	23
3.5.8	Aplicación de las soluciones nutritivas	25
3.6	Registro de variables	25
3.6.1	Determinación de biomasa	26
3.6.2	Determinación de nitrógeno total.....	26
3.7	Análisis estadístico	27
IV.	RESULTADOS	28
4.1	Carta de recepción del artículo científico	28
V.	DISCUSIÓN GENERAL.....	48
VI.	CONCLUSIONES	53
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cultivares empleados. A: San José de Rincón. B: Calimaya	19
Figura 2. Siembra.....	21
Figura 3. Preparación del sustrato.....	22
Figura 4. Trasplante.	22
Figura 5. Preparación de las soluciones nutritivas.....	24
Figura 6. Aplicación de la solución según la etapa fenológica.....	25
Figura 7. Aplicación de las soluciones nutritivas.	25
Figura 8. Método Kjeldahl (1999).	27

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Factores y niveles de estudio.....	20
Cuadro 2. Tratamientos de acuerdo con los factores de estudio.....	20
Cuadro 3. Composición de las soluciones nutritivas	23
Cuadro 4. Análisis del agua de riego	24

RESUMEN GENERAL

El haba es un cultivo clave por su valor nutricional y agronómico. Enfrenta limitaciones de rendimiento debido a factores como estrés hídrico y manejo nutricional deficiente, lo que motiva a desarrollar estudios controlados para comprender la relación entre la dinámica del nitrógeno con el potencial osmótico, el rendimiento y la variabilidad genética. Con el objetivo de determinar el potencial osmótico óptimo para favorecer la absorción de nitrógeno y el crecimiento de la planta. Durante 2022 se estableció un experimento bajo condiciones de invernadero en un diseño completamente al azar con un arreglo factorial $2 \times 2 \times 4$, se emplearon dos colectas provenientes del Estado de México (C17 y C10), dos soluciones nutritivas: Steiner y Arnon-Hoagland, y cuatro potenciales osmóticos (-0.018 , -0.036 , -0.054 , -0.072 MPa⁻¹), con testigos en suelo se utilizó tezontle como sustrato. Se registro altura total (AT), número de tallos (NT), biomasa (B) y nitrógeno total (N). Los resultados mostraron que C17 superó a C10 en NT, B y N en la primera fecha, mientras C10 lideró en AT en la segunda. Ambas soluciones mejoraron AT, NT y B frente al testigo, Arnon-Hoagland destacó en N en la segunda fecha. Potenciales de -0.036 y -0.054 MPa⁻¹ optimizaron AT, NT y B, y -0.072 MPa⁻¹ el N. El tratamiento T12 maximizó altura total y el tratamiento T7 la biomasa. Se concluye que potenciales moderados y una nutrición balanceada mejora desempeño hidropónico de *Vicia faba*, con aplicaciones agronómicas.

Palabras clave: *Vicia faba* L., hidroponía, potencial osmótico, acumulación de nitrógeno

ABSTRACT

The faba bean is a key crop due to its nutritional and agronomic value. It faces yield limitations due to factors such as water stress and poor nutritional management, which motivates the development of controlled studies to understand the relationship between nitrogen dynamics and osmotic potential, yield, and genetic variability. The objective was to determine the optimal osmotic potential to promote nitrogen uptake and plant growth. During 2022, an experiment was established under greenhouse conditions in a completely randomized design with a 2×2×4 factorial arrangement. Two collections from the State of Mexico (C17 and C10) and two nutrient solutions were used: Steiner and Arnon-Hoagland, and four osmotic potentials (-0.018, -0.036, -0.054, -0.072 MPa-1), with controls in soil using tezontle as substrate. Total height (TH), number of stems (NS), biomass (B), and total nitrogen (N) were recorded. The results showed that C17 outperformed C10 in NS, B, and N on the first date, while C10 led in TH on the second date. Both solutions improved TH, NS, and B compared to the control, with Arnon-Hoagland standing out in N on the second date. Potentials of -0.036 and -0.054 MPa-1 optimized TH, SS, and B, and -0.072 MPa-1 optimized N. Treatment T12 maximized total height, and treatment T7 maximized biomass. It is concluded that moderate potentials and balanced nutrition improve the hydroponic performance of *Vicia faba*, with agronomic applications.

Key words: *Vicia faba* L., hydroponics, osmotic potential, nitrogen accumulation.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las legumbres son un pilar fundamental en la alimentación humana y la sostenibilidad agrícola gracias a su alto valor nutricional y su capacidad para enriquecer los suelos mediante la fijación de nitrógeno atmosférico. Entre ellas, haba (*Vicia faba* L.) se distingue como uno de los cultivos más antiguos y extendidos a nivel global, con una historia que abarca miles de años y una presencia significativa en diversas culturas (Mínguez y Rubiales, 2021). Su importancia radica no solo en su aporte proteico, sino también en su versatilidad como cultivo de rotación, lo que contribuye a la salud del suelo y la reducción del uso de fertilizantes sintéticos (Orozco *et al.*, 2013). En 2023, la producción mundial de habas alcanzó aproximadamente 1 829 999 t de haba verde y 7 772 151 t de semilla en seco, con superficies cosechadas de 262 886 ha⁻¹ y 3 603 846 ha⁻¹, respectivamente (FAOSTAT, 2023).

En México, este cultivo es una fuente accesible de nutrientes, especialmente proteínas, y su producción se concentra en Estado de México, Puebla, Michoacán, Tlaxcala y Veracruz. En 2023 el Estado de México se cultivan 4 835 ha⁻¹ de haba verde, donde se obtuvieron 31 629 t con un rendimiento promedio de 6.54 t ha⁻¹, aunque Michoacán lidera en eficiencia con 9.54 t ha⁻¹ (SIAP, 2023).

A pesar de su relevancia, la producción tradicional de habas enfrenta desafíos crecientes, como la degradación del suelo, la escasez de agua y el manejo inadecuado de nutrientes, lo que propicia la proliferación de plagas y enfermedades (Stoddard *et al.*, 2010). Estos factores limitan el rendimiento y exigen soluciones innovadoras. En este contexto, los sistemas hidropónicos emergen como una alternativa viable, no solo para la producción comercial, sino también como una herramienta clave en la investigación agronómica.

La hidroponía permite controlar con precisión variables ambientales y nutricionales. Lo que facilita el estudio de respuestas fisiológicas bajo condiciones específicas. Este enfoque es particularmente útil para evaluar cómo el estrés osmótico y la composición de soluciones nutritivas afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, parámetros críticos en un escenario global de cambio climático y recursos hídricos limitados.

Un factor determinante en este tipo de sistemas es el potencial osmótico (MPa^{-1}), que regula la capacidad de las plantas para absorber agua y mantener la turgencia celular (Taiz *et al.*, 2023).

Estudios previos han demostrado que las leguminosas, como haba, ajustan su potencial osmótico acumulando metabolitos (prolina, azúcares) bajo condiciones de estrés hídrico o salino, lo que les permite mantener el equilibrio hídrico y proteger estructuras celulares (Abid *et al.*, 2016; Farooq *et al.*, 2020). Sin embargo, las respuestas varían entre especies y variedades. Un estudio sobre el potencial osmótico se ha relacionado con diferencias en altura de planta, biomasa y número de tallos en condiciones estrés (Mwanamwenge *et al.*, 1999). De ahí la importancia de utilizar un sistema hidropónico ya que mejora el manejo del riego y nutrición, reduce el estrés hídrico y optimiza el rendimiento.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar el nivel óptimo de potencial osmótico y la formulación de dos soluciones nutritivas que favorezcan el crecimiento y la acumulación de nitrógeno en dos cultivares de *Vicia faba* L. bajo condiciones de hidroponía en invernadero

Objetivos específicos

- Seleccionar la solución nutritiva y el nivel de potencial osmótico más eficiente en haba
- Cuantificar el contenido de nitrógeno total bajo distintos niveles de potencial osmótico y soluciones nutritivas.
- Definir el mejor tratamiento que maximice la acumulación de biomasa.

1.2. HIPÓTESIS

La aplicación de dos soluciones nutritivas diferenciadas combinadas con distintos niveles de potencial osmótico mejorará significativamente el crecimiento de dos cultivares de haba (*Vicia faba* L.), en comparación con los tratamientos testigo establecidos en condiciones edáficas

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen

Aunque su progenitor silvestre y su origen exacto siguen sin identificarse, se cree que es nativa del norte de África y el suroeste de Asia (Singh *et al.*, 2013). Ha sido ampliamente cultivada y asociada a diversos centros de diversidad genética, incluyendo Asia Central, la región mediterránea y América del Sur. Se ha propuesto un posible centro de origen en el Cercano Oriente, desde donde se habría diseminado hacia Europa a través de rutas específicas: por el norte de África hasta España, a lo largo del Nilo hacia Etiopía y desde Mesopotamia hasta la India (Ali Ouji *et al.*, 2011).

Existen centros secundarios de diversidad en Afganistán y Etiopía, aunque otros informes plantean a Asia Central como origen probable. Su uso como alimento se remonta a hace más de 5,000 años en China. También fue cultivada por egipcios, hebreos, griegos y romanos en distintas épocas de la historia antigua. En la India, probablemente fue introducida como cultivo hortícola por los europeos durante el período sultánico (1206–1555). Hoy en día, la planta se cultiva principalmente en Europa, el norte de África, el Medio Oriente y China (Singh *et al.*, 2013; Li y Yang, 2014).

Hoy en día se considera que ciertas regiones del Mediterráneo son centro de origen y su cultivo representa aproximadamente el 25 % del área total destinada a legumbres. Este vegetal destaca por su relevancia nutricional, económica y ecológica. El norte de África se posiciona entre los principales productores mundiales, con superficies de cultivo que oscilan entre 23,000 y 73,000 hectáreas (Aouar-Sadli *et al.*, 2018).

Debido a su valor nutritivo y adaptabilidad, se cultiva en todo el mundo, principalmente en forma de grano seco para consumo humano y alimento animal, pero también se aprovechan sus semillas frescas o sus vainas en países como China e India, donde su cultivo va en aumento. Los granos secos, semillas frescas y brotes representan una fuente alimenticia rica en nutrientes. Además, sus tallos y hojas secas sirven de forraje para ganado, y las flores, con alto contenido de Levodopa, pueden emplearse para preparar infusiones (Zong *et al.*, 2019) y es un precursor de la dopamina con aplicaciones potenciales en el tratamiento del Parkinson (Singh *et al.*, 2013). Por su capacidad de fijar entre 130 y 160 kg de nitrógeno por hectárea, es una excelente opción como abono verde y biofábrica natural de nitrógeno (Singh *et al.*, 2013).

2.2 Importancia

El haba también conocida como fava, broad bean o horse bean, figura entre los cultivos más antiguos del mundo. Se cultiva principalmente como alimento humano en Asia y África, mientras que en Europa su uso se orienta al forraje y al ensilado. Esta leguminosa destaca por su alto contenido de proteico (alrededor del 29% en materia seca), carbohidratos y fibra dietética, además de poseer compuestos bioactivos como fenoles totales y flavonoides, lo que la convierte en una opción nutricional (Dhull *et al.*, 2021). Lo que la convierte en una fuente accesible de proteína para poblaciones de Medio Oriente, América Latina y África, así como en forraje para animales en países desarrollados (Khazaei *et al.*, 2021).

Gracias a su adaptabilidad, su valor como cultivo regenerativo en rotaciones agrícolas y su alta densidad nutricional, se ha convertido en un cultivo global cultivado en todos los continentes excepto en la Antártida (Swamy, 2024).

El ICARDA en Siria alberga la colección mundial de germoplasma de haba, mientras que en la región mediterránea se conserva en el Centro Etíope de Recursos Genéticos y en el Instituto de Germoplasma del CNR en Bari, Italia (Brar *et al.*, 2023). En países como Reino Unido y Francia se utiliza principalmente como forraje animal, mientras que, en regiones mediterráneas, Medio Oriente y China, tiene un papel predominante en la gastronomía (Swamy, 2024; Kosev y Georgieva, 2023).

Actualmente, el haba sigue teniendo un papel importante, especialmente en el contexto de la reducción de gases de efecto invernadero en la agricultura mediante la sustitución de proteínas animales por opciones de origen vegetal. Es la leguminosa de grano con mayor rendimiento y ofrece un contenido proteico frente a otros cultivos de clima templado como el chícharo (*Pisum sativum* L.), lenteja (*Lens esculenta* Moench) o el garbanzo (*Cicer arietinum* L.). Además, gracias a su alta capacidad de fijación biológica de nitrógeno y a sus flores ricas en néctar que atraen polinizadores durante un largo período, el cultivo de haba proporciona valiosos servicios ecosistémicos. Estas características la posicionan como una aliada clave en las estrategias de intensificación agrícola sostenible (Jayakodi *et al.*, 2023). Además, se ha observado una fuerte correlación entre el rendimiento del grano y el contenido de proteína en la semilla (Maalouf *et al.*, 2019).

2.3 Producción mundial

El haba se cultiva en una amplia franja geográfica, que va desde los 50° de latitud norte hasta los 40° de latitud sur, alcanzando altitudes de hasta de 2800 msnm. Se desarrolla en condiciones de riego o de temporal.

En cuanto a superficie cultivada, se produce el 36 % en China, 20 % en Etiopía, 7 % en Marruecos, 6 % en Australia, y menos del 5 % en los demás países. Aproximadamente una cuarta parte de la producción global se comercializa internacionalmente, siendo Egipto el principal importador y Francia, Reino Unido y Australia los principales exportadores (FAOSTAT, 2023).

China lidera la producción mundial de haba, cultivándola en campos de arroz del sur del país tras la cosecha, bajo riego, tanto para semilla verde como para grano seco. En 2016, el área mundial cosechada fue de 2.4 millones de hectáreas, con una producción total de 4.46 millones de toneladas. Aunque se cultiva en más de 55 países, se ha observado una disminución de superficie en regiones como China, el norte de África y Asia occidental, lo que se atribuye a la creciente dependencia de fertilizantes nitrogenados desde los años sesenta. Sin embargo, el rendimiento promedio mundial se ha duplicado, pasando de 0.9 tha^{-1} (1961–1964) a 1.86 tha^{-1} en 2016, gracias al mejoramiento genético (Maalouf *et al.*, 2019).

En 2023, la producción mundial alcanzó aproximadamente 1 829 999 t de vaina verde y 7 772 151 t de haba en seco, con superficies cosechadas de 262 886 ha^{-1} y 3 603 846 ha^{-1} , respectivamente (FAOSTAT, 2023).

2.4 Importancia en México

En México, el cultivo de haba representa una opción accesible para el aporte nutricional, especialmente en cuanto a proteínas, y su producción se concentra principalmente en los estados de México, Puebla, Michoacán, Tlaxcala y Veracruz. Durante el año 2023, en el Estado de México se sembraron 4,835 hectáreas de haba verde, alcanzando una producción total de 31,629 t y un rendimiento promedio de 6.54 tha^{-1} . Sin embargo, Michoacán destacó por su mayor eficiencia productiva, con un rendimiento de 9.54 tha^{-1} (SIAP, 2023).

No obstante, a pesar de su importancia, el cultivo de haba enfrenta diversos problemas, entre ellos el deterioro del suelo, la disponibilidad de agua y la deficiente gestión de nutrientes,

factores que favorecen el desarrollo de plagas y enfermedades (Stoddard *et al.*, 2010; Abebe *et al.*, 2021).

2.5 Limitaciones del cultivo

El rendimiento y calidad pueden verse gravemente afectados por enfermedades fúngicas, que limitan el crecimiento de las plantas e incluso pueden provocar su marchitamiento o muerte. En casos extremos, ciertos patógenos fúngicos han provocado cierres de plantaciones por brotes epidémicos (El-Dawy *et al.*, 2021).

Los principales factores que limitan su cultivo son, a nivel biótico: la mancha de chocolate (*Botrytis spp.*), la roya (*Uromyces viciaefabae*), los pulgones (*Aphis spp.*) y los minadores de hoja (*Liriomyza spp.*); y a nivel abiótico: las heladas durante floración y formación de vainas, así como el estrés hídrico el anegamiento (Redden *et al.*, 2014; O'Sullivan y Angra, 2016).

El calor y la sequía representan amenazas globales, las heladas y el exceso de agua están más ligados a condiciones locales específicas, como los suelos vertisoles de Etiopía o las zonas irrigadas del Nilo en Egipto. En áreas con, las precipitaciones limitadas provocan inestabilidad en el rendimiento del haba.

En Etiopía, la acidez del suelo también representa una barrera importante, debido a toxicidades por iones como el aluminio y deficiencias de nutrientes esenciales como calcio, fósforo o molibdeno. Esta acidez también perjudica la supervivencia y eficacia simbiótica del género *Rhizobium*. Aunque existen cepas más tolerantes, su eficiencia fijadora no siempre se mantiene en suelos ácidos, por lo que se requiere seleccionar tanto por tolerancia como por efectividad simbiótica (Adhikari *et al.*, 2021).

El exceso de temperatura durante la floración reduce la fotosíntesis y por ende, la formación de vainas. Temperaturas superiores a 23 °C pueden detener la floración. La sequía afecta la fase reproductiva, y el cierre de estomas es una respuesta para reducir dicho efecto.

El impacto del granizo en las plantas de haba provoca la aparición de manchas y líneas blancas en las hojas, las cuales pueden desgarrarse, mientras que las vainas llegan a abrirse violentamente, provocando la decoloración rápida de las semillas. En casos severos, el tallo puede dañarse y romperse la parte superior de la planta. Por otro lado, el encharcamiento, común durante la temporada de lluvias y en suelos con mal drenaje, genera síntomas como

ennegrecimiento en las puntas de las hojas, muerte regresiva del tejido foliar, necrosis en hojas jóvenes y ruptura de las células en los ápices de los folíolos (Brar *et al.*, 2023).

2.6 Hidroponía

2.6.1 Definición

La hidroponía, también conocida como cultivo sin suelo, se define como la técnica de crecimiento de plantas mediante soluciones acuosas enriquecidas con nutrientes esenciales, sin emplear suelo orgánico como medio de soporte. Deriva de los términos griegos *hydro* (“agua”) y *ponos* (“trabajo”), introducidos formalmente por William F. Gericke en 1937. En este sistema, las raíces de las plantas reciben directamente una mezcla balanceada de macronutrientes (como nitrógeno, fósforo y potasio) y micronutrientes (como calcio, magnesio y hierro), disueltos en el agua. Dependiendo del diseño del sistema, las raíces pueden permanecer suspendidas en la solución o estar ancladas en medios inertes como perlita, arena o fibra de coco. Este método permite un control preciso del pH, la concentración iónica y la oxigenación del entorno radical, ofreciendo ventajas relevantes como el uso eficiente del agua y la posibilidad de cultivar en espacios reducidos o sin suelo cultivable (Pomoni *et al.*, 2023; Debangshi, 2021; Goh *et al.*, 2023).

2.6.2 Historia

La práctica de cultivar plantas sin suelo lo que hoy denominamos hidroponía tiene raíces profundas en la historia de la botánica y la agricultura. Desde la antigüedad, ya existían rudimentos de estos sistemas; por ejemplo, los antiguos babilonios con sus Jardines Colgantes y los aztecas con sus chinampas construidas en lagos, utilizaban técnicas de cultivo sin suelo aunque no comprendían los principios científicos subyacentes (Velazquez-Gonzalez *et al.*, 2022; Edwards, 2016)

En el siglo XVII, la botánica comenzó a formalizar esta práctica como objeto de estudio: Jan van Helmont demostró que un sauce podía crecer significativamente solo con agua, sin apenas desgaste del suelo; poco después, en 1699 John Woodward comparó el crecimiento de menta en aguas mineralizadas versus destiladas, mostrando mejoras (Caputo, 2022).

Durante el siglo XIX, los científicos germanos Julius von Sachs y Wilhelm Knop iniciaron experimentos formales de “nutricultura”, utilizando soluciones minerales precisamente balanceadas. En 1860 Sachs publicó que las plantas podían desarrollarse de forma robusta solo

en medio acuoso con nutrientes, técnica que Knop refinó paulatinamente (Ranganathapura Sathyanarayana *et al.*, 2022).

El avance decisivo llegó en el siglo XX gracias a William F. Gericke, quien en 1929 promovió el cultivo de plantas de uso comercial como tomates en tanques con solución nutritiva, acuñando en 1937 el término “hydroponics”. Su experimento con tomate de 7.6 m causó gran asombro. Entre 1938 y 1940, los trabajos de Hoagland y Arnon estandarizaron soluciones nutritivas científicamente validadas, y durante la Segunda Guerra Mundial se utilizaron sistemas hidropónicos para alimentar a tropas en islas del Pacífico alrededor de 8 millones de libras de alimento producido (Schafer, 2024).

La década de 1960 vio la creación de técnicas como el NFT (Nutrient Film Technique), desarrollado por Allen Cooper, y la incorporación de medios inertes plásticos y sistemas automatizados. A fines del siglo XX, NASA comenzó a investigar sistemas hidropónicos para entornos espaciales (CELSS), mientras que a principios del siglo XXI se masificó su uso en agricultura urbana, con automatización, sensores y control ambiental apoyado por inteligencia artificial.

2.6.3 La solución nutritiva

En hidroponía, una solución nutritiva es la mezcla acuosa que suministra a las plantas todos los elementos minerales esenciales en las proporciones adecuadas, sin utilizar suelo como medio de crecimiento. Se han desarrollado diversas soluciones nutritivas destinadas al cultivo de plantas en sistemas sin suelo, presentando una considerable variabilidad en su composición química (Smith *et al.*, 1983). Estas soluciones contienen tanto macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) como micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Ni), cada uno desempeñando funciones vitales en crecimiento, fotosíntesis, desarrollo de raíces y síntesis de compuestos celulares (Narisepalli Venkatasai *et al.*, 2025; Sambo *et al.*, 2019). Su formulación se basa en principios de nutrición vegetal y balances de masa, y debe ajustarse según las exigencias específicas de la especie, su etapa de crecimiento y características del agua empleada (van Delden, Nazarideljou, & Marcelis, 2020).

Una de las formulaciones más utilizadas es la solución de Hoagland, desarrollada en los años 30 y revisada en 1950, que proporciona una referencia estándar en la investigación y producción hidropónica. Esta se prepara a partir de sales puras como KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MgSO_4 ,

y fuentes de fósforo, junto con quelatos de hierro para garantizar su disponibilidad a diferentes pH

En 1961, Abram A. Steiner desarrolló un método para preparar soluciones nutritivas ajustadas a proporciones específicas de iones, concentración iónica y pH, evitando precipitación de nutrientes clave (Maucieri *et al.*, 2019). Su enfoque permite calcular previamente la composición de la solución para adaptarla a las exigencias de una especie, lo que facilitó la sistematización de formulaciones hidropónicas (Steiner, 1961). Este método antecede y complementa otras formulaciones como la Hoagland (1938, 1950), a menudo usadas como referencia estándar. Durante el crecimiento, se controlan parámetros clave como el pH (ideal entre 5.5–6.5) y la conductividad eléctrica (1.0–2.5 dS m⁻¹), que reflejan la concentración total y disponibilidad iónica (Patil *et al.*, 2020). En sistemas cerrados, también se monitorean la temperatura y oxigenación para asegurar condiciones óptimas. En esencia, la solución nutritiva es el medio químico central en hidroponía, donde formulaciones como la de Steiner han sido fundamentales para lograr cultivos eficientes, controlados y reproducibles bajo condiciones sin suelo.

Los investigadores mencionan que los niveles de nutrientes necesarios para atender las exigencias fisiológicas de las plantas varían según la especie, lo que imposibilita el uso de una solución nutritiva universalmente efectiva para todas ellas (Juárez - Hernández *et al.*, 2006).

2.6.4 Solución Arnon-Hoagland

La solución nutritiva Hoagland–Arnon (1950) es una versión refinada del esquema original de Hoagland y Snyder (1933) y la revisión de 1938 por Hoagland y Arnon, estableciendo un estándar ampliamente reconocido en investigación hidropónica. Esta formulación fue diseñada para aportar todos los elementos esenciales macronutrientes y micronutrientes en concentraciones cuidadosamente equilibradas basadas en la composición de los tejidos vegetales. En la revisión de 1950, Arnon ajustó ligeramente la concentración de molibdeno (Mo), reduciéndola de 0.048 mg L⁻¹ a 0.011 mg L⁻¹, mientras que los demás nutrientes se mantuvieron igual que en la versión de 1938. La distribución típica es: nitrógeno (210 mg L⁻¹), potasio (235 mg L⁻¹), calcio (160 mg L⁻¹), magnesio (48.6 mg L⁻¹), fósforo (31 mg L⁻¹), azufre (64 mg L⁻¹); y micronutrientes como B (0.5 mg L⁻¹), Mn (0.5 mg L⁻¹), Zn (0.05 mg L⁻¹), Cu (0.02 mg L⁻¹), Mo (0.011 mg L⁻¹), Fe (aprox. 2.9 mg L⁻¹), además de Cl y Na en bajas concentraciones (Hoagland & Arnon, 1950).

Esta solución está compuesta por sales simples como KNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 o $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, además de micronutrientes como H_3BO_3 , MnCl_2 , ZnSO_4 , CuSO_4 y una fuente quelatada de hierro (Fe-EDTA o Fe-EDDHA). Fue diseñada para imitar la disponibilidad de nutrientes en suelos fértiles, pero con control exacto sobre la concentración iónica, pH y relación entre nutrientes, optimizando así el desarrollo vegetal (Zhou *et al.*, 2020; Drop Info, 2018).

Las versatilidad y reproducibilidad de esta formulación la han convertido en referencia: puede emplearse sin diluir para especies de alta demanda nutricional como tomate (*Solanum lycopersicum* L.) o pimiento (*Capsicum annum* L.), o con diluciones en sistemas de cultivo ligero como lechuga (*Lactuca sativa* L.). Asimismo, Hoagland y Arnon recomendaron cambios regulares de la solución para evitar acumulación de sales y mantener un balance nutritivo estable.

En resumen, la solución Hoagland–Arnon de 1950 representa una solución nutritiva científicamente validada, precisa en su composición y ampliamente adoptada en cultivos sin suelo, ofreciendo un entorno ideal para sistemas controlados y sistemáticos en hidroponía.

2.6.5 Solución Steiner

La solución nutritiva de Abram A. Steiner (1961) fue pionera en proponer una fórmula “universal” equilibrada para cultivos hidropónicos, basada en proporciones específicas de cationes y aniones que minimizan el gasto energético de la planta en la absorción de nutrientes. En sistemas de cultivo hidropónico, es posible establecer cualquier proporción de iones y nivel de concentración salina, siempre que no se excedan los umbrales que provocan la precipitación de ciertas combinaciones iónicas. Por ello, la concentración de la solución nutritiva debe ajustarse de manera que tanto el agua como los iones presentes sean absorbidos por la planta en proporción equivalente a la de su presencia en dicha solución (Steiner, 1968).

Steiner (1961) desarrolló un procedimiento para determinar la fórmula que define la composición de una solución nutritiva capaz de cumplir requerimientos específicos.

La solución nutritiva es de carácter universal, caracterizada por proporciones específicas entre aniones y cationes, expresadas como porcentajes del total de milimoles por litro ($\text{mM} \cdot \text{L}^{-1}$). El autor señala que para aplicar esta formulación correctamente, sólo es necesario definir la

presión osmótica óptima del cultivo en determinado periodo del año. Las proporciones relativas entre los aniones son 60% NO_3^- , 5% H_2PO_4^- y 35% SO_4^{2-} ; mientras que las proporciones entre los cationes corresponden a 35% K^+ , 45% Ca^{2+} y 20% Mg^{2+} (Steiner, 1968, 1984).

Coic (1973) y Steiner (1973, 1980) señalaron que tanto la concentración como la composición de dicha solución dependen de diversos factores: el tipo de cultivo, la etapa fenológica, las condiciones ambientales y el sistema hidropónico utilizado, incluyendo la frecuencia de renovación de la solución. Asimismo, indican que las plantas presentan cierta flexibilidad frente al medio nutritivo, ya que absorben los iones siguiendo su propia proporción interna, incluso cuando ésta difiere de la proporción relativa entre los iones presentes en la solución nutritiva. Steiner asumió que las plantas pueden autorregular su absorción, siempre que la solución mantenga un adecuado equilibrio iónico. Este enfoque ha demostrado ser versátil y aplicable a una amplia gama de cultivos, incluidos estudios modernos en melón (*Cucumis melo* L.) y tomate. Sus conceptos sobre balance iónico han sido ampliamente citados en manuales y literatura técnica por décadas.

2.6.6 Concentración total de iones

La reacción fisiológica de las plantas ante la solución nutritiva empleada en sistemas hidropónicos depende de la concentración total de iones expresada como presión osmótica (Steiner, 1966). Esta propiedad fisicoquímica está directamente relacionada con la cantidad de solutos disueltos en la solución (Segal, 1989). Cuando la presión osmótica aumenta como consecuencia de un incremento en los nutrientes o en otros iones, la planta debe realizar un esfuerzo adicional para absorber agua y ciertos elementos, lo que conlleva un mayor consumo de energía metabólica (Asher & Edwards, 1983; Marschner, 1995). De hecho, según Steiner (1961, 1966, 1968, 1973, 1984), diferencias de tan solo 0.2 atmósferas en esta variable pueden generar variaciones significativas en el rendimiento de los cultivos.

2.6.7 pH

Steiner (1968) señala que una solución nutritiva auténtica debe contener los iones en estado libre y activo. Además, destaca que el pH desempeña un papel crucial en la disponibilidad de ciertos iones. Por ejemplo, cuando el pH es elevado, se dificulta mantener concentraciones altas de calcio (Ca^{2+}) y fosfato (PO_4^{3-}), ya que ambos tienden a precipitar como compuestos poco solubles, como el fosfato de calcio (CaHPO_4).

Marschner (1995) indica que el pH influye en la presencia química fosfato de dihidrógeno (H_2PO_4^-), la cual representa la forma de fósforo más fácilmente asimilable por las plantas. De Rijck y Schrevens (1997) explican que a un pH de 5.0, todo el fósforo está presente como H_2PO_4^- , pero conforme el pH se incrementa, esta especie se transforma gradualmente en monofosfato de hidrógeno (HPO_4^{2-}), alcanzando una conversión completa cerca de pH 10. El intervalo óptimo de pH, entre 5 y 6, favorece la predominancia de H_2PO_4^- , lo cual mejora su difusión en el espacio libre aparente alrededor de las raíces y facilita su absorción por las plantas cultivadas en sistemas hidropónicos.

Steiner (1968) suele emplear valores de pH entre 6.0 y 6.5, considerando que este intervalo favorece el equilibrio de disociación de fosfatos y carbonatos, lo cual proporciona una alta capacidad de amortiguamiento del pH. En consecuencia, se puede establecer que el rango óptimo de pH para una solución nutritiva en sistemas hidropónicos se encuentra entre 5 y 6.

El pH de una solución nutritiva no permanece constante, sino que fluctúa según las diferencias en la absorción de nutrientes por las plantas, especialmente en relación con el equilibrio entre aniones y cationes (Juárez *et al.*, 2006).

Cuando las plantas absorben una cantidad mayor de aniones, como ocurre cuando la fuente de nitrógeno en la solución nutritiva proviene exclusivamente de nitrato (NO_3^-), liberan iones hidróxido (OH^-) o bicarbonato (HCO_3^-)

para equilibrar su carga interna (Marschner, 1995), lo que conduce al incremento del pH de la solución hacia niveles alcalinos. Este fenómeno se conoce como alcalinidad fisiológica, y es característico de la solución nutritiva propuesta por Steiner. En otras palabras, a medida que la absorción de aniones supera a la de cationes, el pH de la solución aumenta.

2.6.8 Relación mutua entre aniones y cationes

Steiner (1961) introdujo el concepto de relaciones mutuas entre ciertos aniones, como NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} , así como entre los cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Según su planteamiento, una solución nutritiva debe estar equilibrada no sólo en cuanto a la concentración individual de cada macronutriente, sino también en función de las proporciones relativas entre los aniones y los cationes presentes. Señaló que, al aplicar soluciones nutritivas de manera continua, las plantas tienen la capacidad de absorber iones incluso en concentraciones muy bajas. No

obstante, si dichas concentraciones son excesivamente reducidas, podría no satisfacerse la demanda mínima de ciertos nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

En el extremo opuesto de la concentración, una ingesta excesiva de nutrientes puede generar efectos tóxicos. El debate gira en torno a si existen concentraciones óptimas específicas de ciertos nutrientes para cada cultivo bajo condiciones ambientales particulares, o si son las proporciones relativas las que realmente influyen. Bajo el supuesto de que las concentraciones absolutas son determinantes y fueron definidas experimentalmente, se tendría, por ejemplo, 'a' mmol·l⁻¹ de K⁺, 'b' mmol·l⁻¹ de Ca²⁺ y 'c' mmol·l⁻¹ de Mg²⁺, estableciendo así una relación K⁺:Ca²⁺:Mg²⁺ equivalente a a:b:c. Esta misma proporción también puede expresarse como a/n, b/n y c/n, donde n representa la suma total (a+b+c). Este enfoque permite describir la composición tanto en términos absolutos como relativos, abarcando ambas perspectivas: si las concentraciones absolutas se consideran factores clave, las proporciones relativas también pueden incluirse, siempre que se contemple la concentración iónica total (Juárez *et al.*, 2006).

Steiner (1968) destacó que, más allá de la concentración individual de un ion en una solución nutritiva, lo crucial es la proporción que guarda con otros iones que tienen la misma carga eléctrica. Esta interacción se denomina relación mutua aniónica cuando se trata de aniones, y relación mutua catiónica en el caso de los cationes.

2.6.9 Potencial osmótico

El potencial osmótico (Ψ_s), también denominado potencial de soluto es una componente esencial del potencial hídrico vegetal que refleja la influencia de la concentración de solutos sobre el movimiento del agua. Se define como la medida de degradación del potencial energético del agua debida a la presencia de solutos, lo que provoca una disminución del potencial hídrico total (Yu *et al.*, 2024).

En situaciones de estrés abiótico, como sequía o salinidad, las plantas ponen en marcha mecanismos de ajuste osmótico, acumulando osmólitos compatibles como: azúcares y aminoácidos (por ejemplo, prolina) que reducen el potencial osmótico celular sin interferir con funciones metabólicas críticas, favoreciendo así la retención de agua y el mantenimiento de la turgencia (Khan *et al.*, 2018; Marcińska *et al.*, 2012). Este proceso ha demostrado estar positiva y significativamente asociado con la productividad en condiciones de estrés hídrico en diversos cultivos; por ejemplo, Blum (2017) reportó una correlación significativa entre ajuste osmótico y rendimiento en 24 de 26 casos evaluados en 12 especies.

Así, el manejo del potencial osmótico permite enfrentar desequilibrios hídricos mediante soluciones nutritivas controladas en sistemas hidropónicos, lo cual es especialmente relevante para optimizar el rendimiento de cultivos sometidos a estrés abiótico.

Diversos estudios sobre la absorción de nitrógeno en cultivos (específicamente en soluciones con nitrógeno en forma de nitratos (N-NO_3^-) y nitrógeno en forma de amonio (N-NH_4^+) han evidenciado que, sin un control riguroso de variables como el pH, la presión osmótica y las relaciones mutuas entre aniones y cationes, los resultados pueden ser interpretados de forma incorrecta. La metodología propuesta por Steiner establece criterios técnicos precisos para evitar estos sesgos: mantener constantes las proporciones iónicas, la presión osmótica y el pH. Sin estos lineamientos, pequeñas variaciones (por ejemplo, un aumento de 0.2 atm en la presión osmótica) pueden afectar significativamente el rendimiento de las plantas, haciendo que efectos positivos o negativos sean atribuidos erróneamente a cambios en la concentración de nutrientes. Este análisis resalta la necesidad de diseñar soluciones nutritivas desde un enfoque fisicoquímico integral, asegurando la validez de los resultados en estudios de nutrición vegetal (Juárez *et al.*, 2006).

2.7 Nitrato y Amonio

El nitrógeno absorbido por las plantas proviene principalmente de dos formas inorgánicas: nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), cada una con rutas distintas de absorción, asimilación y regulación fisiológica. El NO_3^- es común en suelos aeróbicos y es captado mediante transportadores de las familias NRT1 y NRT2, participando también como molécula de señalización para activar cascadas genéticas en respuesta rápida, como ocurre en berro oreja de ratón (*Arabidopsis*) y arroz (*Oryza sativa* L.) (Pélissier *et al.*, 2024; Zayed *et al.*, 2023). Una vez absorbido, el nitrato se reduce en dos pasos: primero a nitrito mediante el nitrato reductasa, y luego a amonio vía nitrito reductasa, antes de incorporarse mediante el ciclo de la glutamina sintetasa (GS) y el glutamato sintetasa (GOGAT) (Zayed *et al.*, 2023).

Por su parte, el NH_4^+ es absorbido por transportadores AMT, especialmente relevantes en suelos anaeróbicos o ácidos como los de arrozales (Zayed *et al.*, 2023). La asimilación de amonio es más rápida que la del nitrato, lo que promueve síntesis ágil de aminoácidos como glutamina y glutamato, aunque requiere mayor gasto de esqueletos de carbono (Zayed *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025).

Sin embargo, un suministro exclusivo de NH_4^+ puede resultar tóxico en muchas especies, provocando estrés e inhibición del crecimiento. En contraste, el NO_3^- aporta estabilidad iónica y señalización beneficiosa. Investigaciones actuales resaltan que una mezcla balanceada de NO_3^- y NH_4^+ optimiza el desarrollo radicular, la fotosíntesis y la eficiencia del uso de nitrógeno (Ma *et al.*, 2023; Hao *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025).

2.8 Importancia de la hidroponía como herramienta en la investigación

La hidroponía se ha consolidado como una herramienta esencial tanto en la investigación como en la producción agrícola, gracias a su capacidad para controlar de manera precisa variables clave como la concentración de nutrientes, el pH y la oxigenación del ambiente radical (Nguyen *et al.*, 2016). En el ámbito científico, los sistemas hidropónicos permiten aislar efectos específicos de nutrientes o elementos tóxicos, controlar el entorno de raíces intactas para aplicaciones posteriores y obtener resultados reproducibles en estudios como fisiología vegetal, nutrición mineral y respuesta a estrés abiótico (Nguyen *et al.*, 2016). Asimismo, los sistemas hidropónicos permiten diseñar experimentos bajo estrés abiótico controlado (por ejemplo, toxicidad por metales o déficit de nutrientes) con soluciones diseñadas ad hoc, lo que es especialmente útil en estudios de tolerancia y homeostasis iónica (Nguyen *et al.*, 2016). La reproducibilidad que ofrece este entorno controlado facilita comparaciones entre genotipos y tratamientos con alto rigor experimental.

2.9 Potencial osmótico en el cultivo de haba

Diversos estudios han analizado el potencial osmótico (Ψ_s) y los mecanismos de ajuste osmótico en *Vicia faba* bajo condiciones de estrés hídrico y salino. Katerji *et al.* (2002) evaluaron el estado hídrico del haba frente a diferentes niveles de salinidad del suelo, hallando que la especie presenta una incapacidad para lograr un ajuste osmótico efectivo, aunque mantiene una alta conductancia estomática en condiciones salinas (Katerji *et al.*, 2002). Esto sugiere sensibilidad a salinidad asociada a limitada capacidad de regulación interna del agua.

En estudios hidropónicos, Ghouili *et al.* (2021) indujeron estrés osmótico en potenciales de -0.030 , -0.051 y -0.080 MPa^{-1} , en dos cultivares de subspecies *minor* de *V. faba*. Reportaron respuestas fisiológicas y bioquímicas tempranas, especialmente en la acumulación de azúcares compatibles, vinculadas al ajuste osmótico en tejido foliar (Ghouili *et al.*, 2021). Este trabajo aporta un modelo experimental directamente aplicable a condiciones nutricionales controladas.

Estudios en transgénicos han revelado diferencias entre líneas modificadas y tipo silvestre bajo salinidad: en *V. faba* con el gen PR10a de papa, la reducción del potencial osmótico fue menor en líneas transgénicas comparadas con las silvestres, lo que refleja una mayor capacidad de mantener hidratación celular ante estrés abiótico (Desouky *et al.*, 2021). Estos resultados indican que la regulación del Ψ_s puede mejorarse vía ingeniería genética.

Además, la investigación sobre el metabolismo de azúcares en habas expuestas a estrés osmótico indicó acumulación diferencial de metabolitos y la regulación de genes asociados, en cultivares con mejor tolerancia; reforzando que los solutos compatibles son marcadores del ajuste osmótico (Ghouli *et al.*, 2021).

Tavakkoli *et al.* (2012) reportaron que *V. faba* cultivada hidropónicamente con -0.030 a -0.080 MPa^{-1} de CE mostró ajustes en potencial osmótico, acumulación de azúcares y modificaciones en la expresión de genes asociados con tolerancia, demostrando además la variación cultivar de la respuesta. Así mismo, en estudios sobre salinidad ($75\text{--}150 \text{ mM NaCl}$), un menor potencial osmótico foliar se relaciona con mayor tolerancia, evidenciando que tanto la exclusión iónica como la acumulación de solutos orgánicos son mecanismos esenciales.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

El ensayo se llevó a cabo en el invernadero No. 1 de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicado Carretera Toluca - Ixtlahuaca Kilómetro 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca de Lerdo, Estado de México, Latitud 19°24'34 Longitud 99°41'27. a una altitud de 2660 m⁻¹.

3.2 Material vegetal

El material vegetal se obtuvo de dos colectas de dos cultivares de haba, uno de San Felipe de Jesús, en el municipio de San José del Rincón, (C17) y el segundo de Zaragoza de Guadalupe, en el municipio de Calimaya (C10), ambos en el Estado de México (Figura 1).

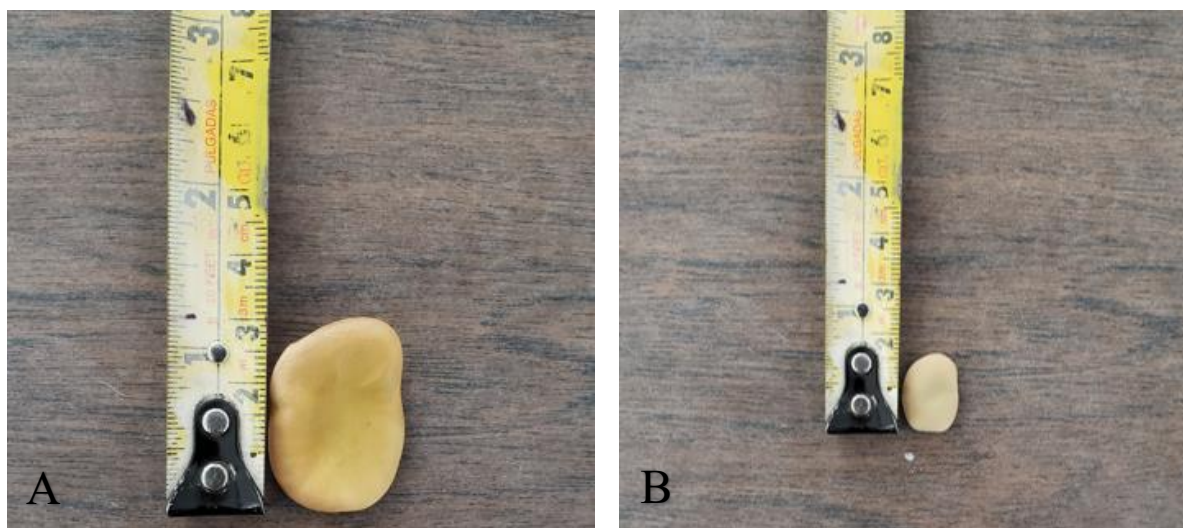


Figura 1. Cultivares empleados. A: San José de Rincón. B: Calimaya

3.3 Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2 x 4 (dos colectas, dos soluciones nutritivas y cuatro niveles de potencial osmótico), además de un testigo por cultivar, para los testigos se empleó suelo agrícola como sustrato, cada tratamiento contó con cuatro repeticiones (Cuadro 1).

Cuadro 1. Factores y niveles de estudio

Factores	Niveles
Cultivares	C17 = San Felipe de Jesús C10 = Zaragoza de Guadalupe
Solución nutritiva	Steiner Arnon-Hoagland
Potencial osmótico	-0.018MPa ⁻¹ ; -0.036MPa ⁻¹ ; -0.054MPa ⁻¹ ; -0.072 MPa ⁻¹

3.4 Diseño de tratamientos

Se emplearon dos soluciones nutritivas: Steiner y Arnon-Hoagland, así como cuatro diferentes potenciales osmóticos (-0.018 MPa⁻¹, -0.036 MPa⁻¹, -0.054 MPa⁻¹, -0.072 MPa⁻¹) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos de acuerdo con los factores de estudio

Tratamientos	Cultivar	Solución	Ψ _o (MPa ⁻¹)	CE (dS m ⁻¹)
T1	C17	Steiner	-0.018	0.5
T2	C17	Steiner	-0.036	1.0
T3	C17	Steiner	-0.054	1.5
T4	C17	Steiner	-0.072	2.0
T5	C17	Arnon y Hoagland	-0.018	0.5
T6	C17	Arnon y Hoagland	-0.036	1.0
T7	C17	Arnon y Hoagland	-0.054	1.5
T8	C17	Arnon y Hoagland	-0.072	2.0
T9	C17	Agua de la llave		
T10	C10	Steiner	-0.018	0.5
T11	C10	Steiner	-0.036	1.0
T12	C10	Steiner	-0.054	1.5
T13	C10	Steiner	-0.072	2.0
T14	C10	Arnon y Hoagland	-0.018	0.5
T15	C10	Arnon y Hoagland	-0.036	1.0
T16	C10	Arnon y Hoagland	-0.054	1.5
T17	C10	Arnon y Hoagland	-0.072	2.0
T18	C10	Agua de la llave		

3.5 Establecimiento del experimento

3.5.1 Fechas de siembra

Se establecieron dos fechas de siembra una en abril (26/04/2022) y otra en mayo (13/05/2022). Con el fin de medir la influencia del clima en el experimento.

3.5.2 Siembra

La siembra se realizó en vasos de unicel de 350 mL⁻¹ (Figura 2). Como sustrato se utilizó una mezcla de peat moss y agrolita en una proporción 6:4. Durante esta etapa los riegos se realizaron con agua de la llave (0.44 dS m⁻¹). Para los testigos se utilizó suelo agrícola.



Figura 2. Siembra.

3.5.3 Preparación y esterilización del sustrato

Para el trasplante, primero se llenaron bolsas de polietileno negras calibre 600 de 35 * 35 cm⁻¹ de 9 L⁻¹ de capacidad con tezontle rojo de granulometría menor a 2 cm⁻¹ y con suelo agrícola para los testigos. Posteriormente este sustrato fue esterilizado utilizando una solución de hipoclorito de sodio al 1% y dejando reposar durante 24 h, transcurrido este tiempo las bolsas fueron perforadas en la parte inferior para poder lavar el sustrato con abundante agua con la finalidad de eliminar los rastros de cloro que pudieran persistir, una vez realizado el lavado se dejaron reposar 24 h más con el fin de permitir que el cloro restante se evaporara. Finalmente

se realizaron pruebas de retención de humedad del sustrato con el fin de determinar la frecuencia de los riegos y la aplicación de las soluciones nutritivas (Figura 3).



Figura 3. Preparación del sustrato.

3.5.4 Trasplante

El trasplante se realizó cuando las plantas presentaron dos hojas verdaderas durante la mañana evitando el golpe de calor. Se depositó una planta por bolsa, con todo y el cepellón. Al momento del trasplante se realizó la aplicación de aminoácidos AMIKRONE® aplicando un 1 mL L^{-1} . Esto con el fin de disminuir los efectos del estrés que el trasplante ocasiona sobre las plantas (Figura 4).



Figura 4. Trasplante.

3.5.6 Tratamientos de fertilización

Para los tratamientos de fertilización se emplearon las soluciones nutritivas (Steiner, 1966) y la solución (Hoagland y Arnon, 1950) modificada (Cuadro 3), para la segunda solución el N-total se aplicó 80% en forma de nitrato (NO_3^-) y el 20% en forma de amonio (NH_4^+). Las soluciones nutritivas se aplicaron con cuatro potenciales osmóticos diferentes como se indica en el Cuadro 2). Las fuentes de macronutrientes que se usaron para la preparación de las soluciones nutritivas fueron: nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; nitrato de potasio KNO_3 ; sulfato de potasio K_2SO_4 ; sulfato de magnesio $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; fosfato monopotásico KH_2PO_4 ; sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ las fuentes empleadas fueron de origen comercial. Para el caso de los micronutrientes las fuentes empleadas fueron: Ultrasol micro Rexene BSP® (Mn, B, Zn, Cu y Mo) y Ultrasol micro Rexene Fe Q48® (Fe).

Cuadro 3. Composición de las soluciones nutritivas

Solución nutritiva	CE (dS m ⁻¹)	N total	N-NO ₃	N-NH ₄	P-PO ₄	K	Ca	Mg	S-SO ₄
			mEq L ⁻¹						
Steiner	2.0	12	12	-	1	7	9	4	7
Arnon-Hoagland	2.4	18.3	14.5	3.8	1	6.1	9.4	4.1	7.9

3.5.7 Formulación y preparación de las soluciones nutritivas

Con la finalidad de aumentar la precisión para los cálculos de las soluciones nutritivas se realizó un análisis de agua (Cuadro 4).

Para la preparación de las soluciones nutritivas, primero se realizó el balance entre aniones y cationes con la finalidad de evitar efectos de antagonismo entre elementos tomando en cuenta las fuentes de fertilizantes empleadas. Esto se realiza tomando en cuenta los elementos aportados por el agua expresados en mEq L⁻¹ y restarlos de los requerimientos. Una vez que confirmamos que nuestra solución se encuentra balanceada, necesitamos calcular la cantidad de nutrientes que aporta cada fertilizante. Así como la cantidad necesaria de cada fertilizante para cada nivel de potencial osmótico. Realizado el balance se procedió a pesar los fertilizantes a agregar.

El siguiente paso fue llenar 18 cubetas de 20 L⁻¹ (una por tratamiento) y se ajustó el pH del agua de riego a 6.0, empleando H₃PO₄ grado técnico al 85% (Figura 5). Posteriormente se agregaron y disolvieron los fertilizantes de acuerdo con su solubilidad (del menos soluble al más soluble). Finalmente, para comprobar el pH y la conductividad eléctrica se utilizó un medidor de pH y CE (EZ-9909SP).



Figura 5. Preparación de las soluciones nutritivas.

Cuadro 4. Análisis del agua de riego

Parámetro	Resultado	Unidades
pH	7.92	-
CE	0.44	dS m ⁻¹
RAS	1	-
HCO ₃	3.90	mEq L ⁻¹
Ca	24.6	mg L ⁻¹
Mg	22.4	mg L ⁻¹
Na	28.5	mg L ⁻¹
K	6.65	mg L ⁻¹
S-SO ₄	4.16	mg L ⁻¹
N-NO ₃	0.56	mg L ⁻¹

3.5.8 Aplicación de las soluciones nutritivas

La aplicación de las soluciones nutritivas con diferente potencial osmótico se realizó de forma gradual y en base a la etapa fenológica del cultivo, empezando todos los tratamientos en -0.018 MPa⁻¹ hasta que cada tratamiento alcanzó el potencial osmótico deseado (Figura 6).



Figura 6. Aplicación de la solución según la etapa fenológica.

Los riegos se realizaron en función de la retención de humedad del sustrato empleado. Para realizar el riego se utilizaron vasos de polietileno de 1 L⁻¹ (Figura 7).



Figura 7. Aplicación de las soluciones nutritivas.

3.6 Registro de variables

Se realizó a los 160 días después del trasplante para cada fecha de siembra. Al momento de la cosecha se separaron las plantas por tejido vegetal en tallos, hojas y vainas. Las variables

registradas fueron: altura total (AT), el número de tallos (NT). Posteriormente las plantas se pesaron en una balanza analítica (ULINE H-9884) con el fin de obtener el peso fresco.

3.6.1 Determinación de biomasa

Una vez determinado el peso fresco las plantas fueron secadas durante 72 horas a 70 °C con la ayuda de una estufa aire forzado y su peso fue determinado nuevamente. Una vez determinados los pesos se utilizó la siguiente fórmula para determinar la biomasa total:

$$B = P - P^l.$$

Donde:

- B= Biomasa
- P= Peso fresco
- P^l= Peso seco

3.6.2 Determinación de nitrógeno total

El nitrógeno total (N) se determinó mediante el método micro Kjeldahl (Alcántar & Sandoval, 1999). Una vez seco el tejido a analizar (hoja), este se molió hasta obtener un polvo fino, el siguiente paso fue pesar 0.1 g⁻¹ de la muestra molida, se le adiciono 1.5 mL⁻¹ de la mezcla de ácido sulfúrico y salicílico y se dejó reposar toda la noche, al siguiente día se agregó 0.2 g⁻¹ de mezcla de sulfatos y digirió en el digestor Kjeldahl, finalizada la digestión se dejó enfriar y se agregaron 10 mL⁻¹ de agua destilada, se transfirió al equipo de destilación (Kjeltec™ 2100) y se agregó 10 mL⁻¹ de hidróxido de sodio al 50%. Finalmente, el destilado se recibe en la solución indicadora con ácido bórico al 4% y se titula con ácido sulfúrico 0.05 N hasta el vire a color rosado claro (Figura 8). Para mayor rigor se utilizaron dos blancos para las pruebas.

Para realizar el cálculo del contenido de nitrógeno se utilizó la siguiente fórmula:

$$N\% = (mL H_2SO_4)(N de H_2SO_4)(14)$$

Donde:

- N%: Porcentaje de nitrógeno total.
- mL⁻¹ H₂SO₄: mililitros de ácido sulfúrico gastados durante la titulación.
- N de H₂SO₄: normalidad del ácido sulfúrico utilizado para titular
- 14: Constante obtenida de la cantidad de muestra necesaria (14/0.1 g⁻¹)

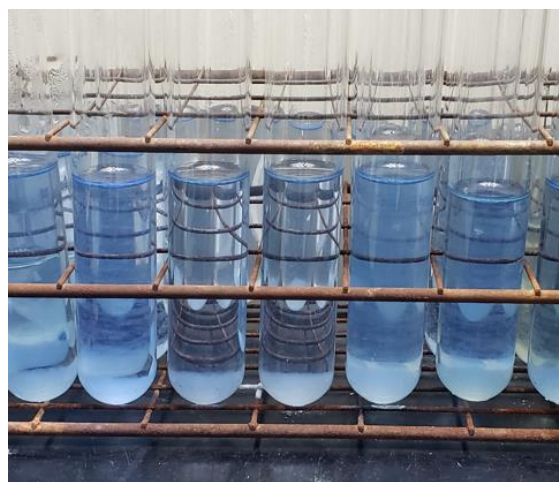


Figura 8. Método Kjeldahl (1999).

3.7 Análisis estadístico

El análisis de varianza combinado y la comparación de medias de Tukey al nivel de 0.05 de probabilidad de error se realizaron con apoyo del software SAS OnDemand for Academics (2023).

Dinámicas de crecimiento y acumulación de nitrógeno en haba bajo hidroponía

José David Varela-González¹, Delfina de Jesús Pérez-López², Andrés González-Huerta², José Francisco Ramírez-Dávila², Martín Rubí-Arriaga², Rodolfo Serrato-Cuevas².

1 Programa de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, México. C.P. 50200, e-mail: josvarg@live.com.mx

2 Centro de Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Campus Universitario "El Cerrillo", Toluca, México. C.P. 50200 (mrubia@uaemex.mx; rserratoc@uaemex.mx; jframirez@uaemex.mx; djperez@uaemex.mx)

Autor para correspondencia: djperez@uaemex.mx

Resumen

El objetivo del trabajo fue evaluar dos soluciones nutritivas (Steiner y Arnon-Hoagland) y cuatro niveles de potencial osmótico más el testigo sobre el crecimiento y la acumulación de nitrógeno en dos cultivares de haba en condiciones hidropónicas. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 2×2×4 en invernadero. Se registro altura total (AT), número de ramas (NT), biomasa (B) y nitrógeno total (N), en dos fechas de siembra. Se realizó un análisis de varianza y la prueba de Tukey ($p=0.05$). C17 presentó mayor biomasa (702.84 g^{-1}), NT (19.66) y N (4.76%) en la primera fecha, mientras que C10 destacó en AT en la segunda fecha. Las soluciones nutritivas superaron al testigo en todas las variables; la formulación Arnon-Hoagland promovió una mejor acumulación de N. Los potenciales osmóticos de -0.036 y -0.054 MPa^{-1} fueron óptimos para promover crecimiento, mientras que -0.072 MPa^{-1} favoreció la concentración de N en tejidos foliares.

Palabras clave: *Vicia faba* L., Steiner, solución nutritiva, nitrógeno.

Introducción

Vicia faba L se utiliza en la alimentación humana, tanto en forma de grano seco como en vaina verde, (Caracuta *et al.*, 2015). Destaca su importancia por su contenido proteico (entre 9 y 32 %), y por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (Volpelli, 2010; Gutiérrez, 2008; Crepón, 2010). Se cultiva en más de 55 países, ocupando un área de 2.46 millones de ha⁻¹ y genera 4.84 millones de t de grano seco. En México, se siembra en la región de Valles Altos, siendo el estado de México el mayor productor de vaina verde, con un rendimiento promedio de 6.54 t ha⁻¹ (SIAP, 2023).

La productividad del haba está limitada por factores bióticos y abióticos, lo que exige la implementación de técnicas agronómicas más controladas. Una de las alternativas es la hidroponía, es un sistema de cultivo sin suelo que permite regular de forma precisa el sistema radicular de la planta, optimizar el uso del agua, nutrientes y espacio, como reducir la incidencia de enfermedades. (Beltrano y Giménez, 2015). Esta técnica es útil para evaluar como el estrés osmótico y la composición de soluciones nutritivas ayudan al crecimiento y desarrollo de las plantas, ante el efecto de cambio climático y recursos hídricos limitados.

Un factor determinante es el potencial osmótico (MPa⁻¹), que regula la capacidad de las plantas para absorber agua y mantener la turgencia celular (Taiz *et al.*, 2023). Estudios recientes han demostrado que, bajo estrés osmótico inducido en sistemas hidropónicos, se activan respuestas fisiológicas clave, incluyendo el ajuste osmótico mediante la acumulación de azúcares solubles y otros solutos compatibles (Abahri, 2015; Farooq *et al.*, 2020; Ghouili *et al.*, 2021). A medida que aumenta la concentración de solutos en la solución nutritiva, el potencial osmótico disminuye, lo

que reduce la energía libre del agua y exige mayor esfuerzo metabólico a la planta para su absorción (Salisbury *et al.*, 1994).

El análisis de la concentración de nitrógeno en órganos como la hoja ofrece información sobre procesos fisiológicos clave, como la translocación de solutos, la tolerancia al estrés hídrico y la eficiencia de absorción radicular. Estos indicadores resultan esenciales para comprender la capacidad adaptativa de cada cultivar frente a distintas condiciones osmóticas. Por ello, establecer las condiciones más adecuadas para el desarrollo de cada variedad resulta prioritario para maximizar el rendimiento del cultivo de haba, en congruencia con las tecnologías de producción disponibles en cada región. Por lo objetivo del trabajo de investigación fue Identificar el nivel óptimo de potencial osmótico y la formulación de dos soluciones nutritivas que favorezcan el crecimiento y la acumulación de nitrógeno en dos cultivares de *Vicia faba* L. bajo condiciones de hidroponía en invernadero

Materiales y metodos

La investigación se llevó a cabo en el invernadero número 1, del Campus Experimental el Cerrillo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, con coordenadas latitud 19°24'34" y longitud 99°41'27". El experimento se estableció en dos fechas de siembra (01/04/2022 y 26/04/2022), bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2*2*4, dos colectas, dos soluciones nutritivas y cuatro niveles de potencial osmótico. Cada tratamiento consideró tres repeticiones.

El material vegetal utilizado se obtuvo de dos colectas realizadas en los municipios de San Felipe de Jesús en San José del Rincón (C17) y Zaragoza de Guadalupe en Calimaya (C10), ambos en el Estado de México.

Establecimiento del experimento

Para el establecimiento del experimento, las semillas se colocaron en vasos de unicel de 350 mL⁻¹, se utilizó una mezcla de agrolita y peat moss en una proporción de 60/40 (v/v) como sustrato. Se depositó una semilla por vaso y una vez que las plántulas presentaron dos hojas verdaderas, estas se trasplantaron a bolsas de polietileno negras con una capacidad de 10 litros, el tezontle rojo fue usado como sustrato, previamente desinfectado con hipoclorito de sodio al 1%.

Se emplearon dos soluciones nutritivas: Steiner y Arnon-Hoagland, así como cuatro diferentes potenciales osmóticos (-0.018 MPa⁻¹, -0.036 MPa⁻¹, -0.054 MPa⁻¹, -0.072 MPa⁻¹) (Tabla 1). Las soluciones nutritivas se aplicaron según la etapa fenológica, incrementando desde -0.018 MPa⁻¹ hasta alcanzar el potencial osmótico deseado para cada tratamiento. Se utilizó un testigo para cada colecta, se empleó suelo agrícola como sustrato y regado con agua de la llave. Para el cálculo de las soluciones nutritivas, se realizó un análisis de agua y se ajustó el pH a 6 donde se utilizó ácido fosfórico. El volumen de aplicación de la solución se determinó con base a la retención de agua del sustrato.

Tabla 1 Distribución de colectas, soluciones nutritivas y tratamientos

Tratamiento	Colecta	Solución nutritiva		Ψ (MPa ⁻¹)
T1	C17	Steiner	P1	-0.018
T2	C17	Steiner	P2	-0.036
T3	C17	Steiner	P3	-0.054
T4	C17	Steiner	P4	-0.072

T5	C17	Arnon-Hoagland	P1	-0.018
T6	C17	Arnon-Hoagland	P2	-0.036
T7	C17	Arnon-Hoagland	P3	-0.054
T8	C17	Arnon-Hoagland	P4	-0.072
T9	C17	Agua de la llave		N/A
T10	C10	Steiner	P1	-0.018
T11	C10	Steiner	P2	-0.036
T12	C10	Steiner	P3	-0.054
T13	C10	Steiner	P4	-0.072
T14	C10	Arnon-Hoagland	P1	-0.018
T15	C10	Arnon-Hoagland	P2	-0.036
T16	C10	Arnon-Hoagland	P3	-0.054
T17	C10	Arnon-Hoagland	P4	-0.072
T18	C10	Agua de la llave		N/A

Muestreo y determinación de variables

Las plantas se cosecharon a 160 días después de la siembra (vaina verde) para cada fecha de siembra. Al momento de la cosecha, se registró la altura total (AT) y el número de tallos (NT). Posteriormente, las plantas se pesaron en una balanza (ULINE H-9884) y se introdujeron en una estufa de aire forzado a 70°C hasta alcanzar un peso constante (72 horas), para luego pesarlas nuevamente y obtener la biomasa a cosecha (B). El nitrógeno total (N) se determinó mediante el método micro Kjeldahl (Alcántar & Sandoval, 1999).

Análisis estadístico

El análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias de Tukey se realizaron con apoyo del software SAS OnDemand for Academics (2023).

Resultados y Discusión

En términos de efectos individuales, las colectas mostraron respuestas contrastantes según la fecha de siembra. En la primera fecha, C17 superó a C10 en NT, B y N, sin diferencias en AT, lo que sugiere una mayor capacidad de acumulación de recursos, posiblemente ligada a una tolerancia genética al estrés osmótico, como reportan Khan *et al.* (2010). Este patrón podría reflejar una estrategia de crecimiento que prioriza la biomasa sobre la elongación, como observaron Munns y Tester (2008) en plantas bajo estrés moderado. En la segunda fecha, C10 destacó en AT sin diferencias en las demás variables (Tabla 2), resultado que podría estar influenciado por factores ambientales como el fotoperiodo o la temperatura, según lo reportado por Khan *et al.* (2010).

Las soluciones nutritivas (Arnon-Hoagland y Steiner) superaron consistentemente al testigo en AT, NT y B en ambas fechas, un beneficio atribuible a la nutrición balanceada, como subrayan Farooq *et al.* (2020) y Epstein y Bloom (2005). Sin embargo, el N solo mostró diferencias en la segunda fecha, donde Arnon-Hoagland superó a Steiner (Tabla 2). Este comportamiento específico del N coincide con lo reportado por Hoagland y Arnon (1938), quienes destacaron que la formulación de Arnon-Hoagland favorece una mayor disponibilidad de nitrógeno, posiblemente debido a su composición de sales y balance iónico. La variabilidad temporal en la respuesta al N sugiere que factores como la etapa fenológica del cultivo o las condiciones ambientales podrían modular la eficiencia de absorción de este nutriente.

El potencial osmótico también marcó diferencias claras: el testigo presentó los valores más bajos (Tabla 2), mientras que -0.036 MPa^{-1} y -0.054 MPa^{-1} fueron óptimos en la primera fecha (AT, B, N y NT, respectivamente) y -0.054 MPa^{-1} y -0.072 MPa^{-1} en la segunda (AT, NT, B y N, respectivamente). Esto sugiere que potenciales moderados facilitan el ajuste osmótico, como proponen Li *et al.* (2018) quienes proponen que un potencial osmótico ligeramente negativo facilita el ajuste osmótico al mantener un balance adecuado entre la disponibilidad de agua y la acumulación de solutos compatibles, así se mejoró la tolerancia al estrés y la eficiencia fisiológica, mientras que valores más negativos concentran nitrógeno bajo condiciones específicas (Turner, 2018), posiblemente por una mayor acumulación de osmolitos compatibles, como aminoácidos o azúcares, que ayudan a mantener la turgencia celular y podrían estar asociados con una mayor captación y retención de nutrientes (Shabala & Lew, 2002). Este equilibrio favorece procesos celulares clave como la turgencia, expansión celular y transporte de solutos, promoviendo un desarrollo más eficiente bajo condiciones de cultivo controlado. Por otro lado, estos hallazgos resaltan la dualidad del potencial osmótico: mientras niveles moderados favorecen el crecimiento, valores más extremos podrían inducir respuestas fisiológicas dirigidas a la supervivencia, como la redistribución de nitrógeno y la síntesis de compuestos osmorreguladores.

Tabla 2. Efecto de la Colecta, Solución nutritiva y Potencial osmótico en el crecimiento de haba.

Factor	Primera fecha				Segunda fecha			
	AT (m)	NT	B (g)	N (%)	AT (m)	NT	B (g)	N (%)
Colecta								
C10	2.30 a	15.97 b	577.58 b	4.53 b	2.22 a	16.11 a	652.3 a	6.25 a

C17	2.24 a	19.66 a	702.84 a	4.76 a	2.06 b	17.66 a	643.23 a	6.03 a
Solución nutritiva								
Steiner	2.34 a	17.90 a	700.59 a	4.66 a	2.20 a	17.46 a	674.56 a	5.62 b
Arnon-Hoagland	2.31 a	19.50 a	659.36 a	4.66 a	2.19 a	17.12 a	705.39 a	6.62 a
Testigo	1.87 b	10.75 b	322.1 b	4.54 a	1.68 b	13.62 b	310.09 b	6.29 a
Ψ_o (MPa ⁻¹)								
-0.018	2.32 ab	19.18 a	653.62 ab	4.48 b	2.21 a	16.31 b	595.25 c	5.48 c
-0.036	2.42 a	17.56 a	728.81 a	4.77 a	2.13 b	15.93 bc	687.44 b	5.88 bc
-0.054	2.34 a	19.68 a	724.71 a	4.63 ab	2.28 a	19.31 a	781.72 a	6.40 a
-0.072	2.20 b	18.37 a	612.75 b	4.76 a	2.16 ab	17.62 ab	695.49 b	6.73 a
Testigo	1.87 c	10.75 b	322.1 c	4.54 b	1.68 c	13.62 c	310.09 d	6.29 ab
CV	14.15	34.5	29.86	8.42	13.49	33.52	25.02	18.16

Promedios seguidos de la misma letra en columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey,

$P \leq 0.05$). CV = coeficiente de variación.

Las interacciones dobles ofrecieron una visión más detallada y revelaron comportamientos diferenciados según la combinación genotipo por solución nutritiva. Para la primera interacción, Colecta × Solución (Tabla 3), C10 × Steiner maximizó AT en ambas fechas, probablemente debido al balance óptimo entre nutrientes y regulación osmótica en la solución Steiner que favoreció la expansión celular, y la inherente capacidad del genotipo C10 para aprovechar este balance, de

esta forma se manifestó un mayor crecimiento vegetativo bajo condiciones controladas. (Steiner, 1984), además favorece el crecimiento vegetativo en genotipos tolerantes al estrés hídrico (Verslues *et al.*, 2006). En contraste, C17 × Arnon-Hoagland destacó en NT y B en ambas fechas, y en N en la primera, de esta forma se refleja una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes (Hoagland & Arnon, 1938). El resultado de C10 × Testigo lideró en N en la segunda fecha es notable este fenómeno podría reflejar un mecanismo de adaptación a condiciones de baja disponibilidad nutrimental, consistente con los mecanismos de aclimatación reportados por Abid *et al.* (2016) y Blum (2018) en condiciones de estrés nutricional.

Tabla3. Interacción Colecta x Solución nutritiva.

Interacciones	Primera fecha				Segunda fecha			
	AT (m)	NT	B (g)	N (%)	AT (m)	NT	B (g)	N (%)
C10 x Steiner	2.43 a	15.12 bc	661.94 b	4.69 b	2.34 a	16.87 a	694.1 a	5.54 c
C10 x A-H	2.33 a	17.56 b	562.04 c	4.38 c	2.23 ab	16.00 ab	695.03 a	6.68 b
C10 x Testigo	1.71 d	13 c	302.22 e	4.53 bc	1.66 d	13.5 b	314.12 b	7.40 a
C17 x Steiner	2.25 b	20.68 a	739.23 ab	4.63 b	2.06 c	18.06 a	655.01 a	5.70 c
C17 x A-H	2.29 ab	21.43 a	756.66 a	4.95 a	2.16 bc	18.25 a	715.75 a	6.57 b
C17 x Testigo	2.03 c	8.5 d	341.97 de	4.55 b	1.70 d	13.75 b	306.05 b	5.18 c

Promedios seguidos de la misma letra en columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey,

$P \leq 0.05$).

Con respecto a la segunda interacción, Colecta × Potencial Osmótico (Tabla 4), C10 mostró estabilidad en la primera fecha (excepto P4), mientras que C17 × P3 (-0.054 MPa⁻¹) favoreció NT y B en ambas fechas, y C17 × P2 (-0.036 MPa⁻¹) N en la primera, alineándose con Link *et al.* (1999) sobre la ventaja de potenciales intermedios. En la segunda fecha, C10 × P3 destacó en AT y C10 × Testigo en N, lo que Khan *et al.* (2010) atribuyen a interacciones temporales con el ambiente.

Tabla 4. Interacción Colecta x Potencial osmótico.

Interacciones	Primera fecha				Segunda fecha			
	AT (m)	NT	B (g)	N (%)	AT (m)	NT	B (g)	N (%)
C10 x P1	2.38 a	18.37 b	578.15 c	4.29 d	2.12 cd	18.75 bc	710.70 b	5.23 de
C10 x P2	2.46 a	14.87 cd	735.61 b	4.68 b	2.27 b	15.62 d	656.48 b	5.61 d
C10 x P3	2.36 a	14.5 d	584.37 c	4.43 cd	2.51 a	15.50 d	732.50 b	6.50 b
C10 x P4	2.30 b	17.62 bc	549.83 c	4.73 ab	2.25 bc	15.87 d	678.60 b	7.10 a
C10 x Testigo	1.71 e	13 d	302.22 d	4.53 c	1.66 e	13.50 e	314.12 d	7.40 a
C17 x P1	2.26 bc	20 b	729.08 b	4.67 b	2.30 b	13.87 d	479.80 c	5.74 cd
C17 x P2	2.39 a	20.25 b	722 b	4.87 a	2.00 d	16.25 cd	718.38 b	6.15 bc
C17 x P3	2.32 ab	24.87 a	865.05 a	4.83 a	2.05 d	23.12 a	830.95 a	6.30 b
C17 x P4	2.11 cd	19.12 b	675.66 b	4.8 a	2.08 d	19.37 b	712.38 b	6.37 b
C17 x Testigo	2.03 d	8.5 e	341.97 d	4.55 bc	1.7 e	13.75 de	306.05 d	5.18 e

Promedios seguidos de la misma letra en columna, no son estadísticamente diferentes

(Tukey, $P \leq 0.05$).

En la interacción Solución \times Potencial Osmótico (Tabla 5) reveló patrones más complejos. En la primera fecha, Arnon-Hoagland \times P2 favoreció AT y N, Steiner \times P3 favoreció B, y Arnon-Hoagland \times P1 NT. En la segunda, Steiner \times P3 y P4 optimizaron AT y NT, y Arnon-Hoagland \times P3 y P4 B y N, respectivamente. Esto sugiere que Steiner mejora el crecimiento vegetativo a potenciales moderados (Steiner, 1984), mientras que Arnon-Hoagland concentra nitrógeno a niveles más negativos (Turner, 2018), un efecto que podría potenciarse por la capacidad buffer del tezontle para regular la humedad (Larcher, 2003) que modula la disponibilidad real de agua a distintos potenciales aplicados. La variación entre fechas podría deberse a factores como la temperatura o la luz, como señala Fitter y Hay (2012) que afectan la demanda evapotranspirativa y, consecuentemente, la respuesta a los tratamientos entre fechas de evaluación.

Tabla 5. Interacción Solución nutritiva x Potencial osmótico.

Interacciones	Primera fecha				Segunda fecha			
	AT (m)	NT	B (g)	N (%)	AT (m)	NT	B (g)	N (%)
Steiner x P1	2.35 a	17.87 a	690.86 b	4.55 c	2.20 ab	15.62 c	568.9 d	4.59 d
Steiner x P2	2.42 a	15.87 b	716.27 b	4.6 c	2.24 a	15.50 cd	685.88 b	5.13 c
Steiner x P3	2.39 a	20.25 a	823.87 a	4.69 bc	2.29 a	18 bc	724.31 b	6.14 b
Steiner x P4	2.18 b	17.62 ab	571.33 c	4.8 ab	2.07 bc	20.75 a	719.13 b	6.63 a

A-H x P1	2.29 ab	20.5 a	616.37 c	4.41 d	2.22 a	17.00 c	621.60 cd	6.37 ab
A-H x P2	2.43 a	19.25 a	741.33 ab	4.95 a	2.02 c	16.37 c	688.98 b	6.63 a
A-H x P3	2.29 ab	19.12 a	625.55 c	4.57 c	2.27 a	20.62 ab	839.13 a	6.65 a
A-H x P4	2.23 b	19.12 a	654.16 bc	4.73 b	2.26 a	14.50 d	671.85 bc	6.82 a
Testigo	1.87 c	10.75 c	322.1 d	4.54 cd	1.68 d	13.62 d	310.08 e	6.29 b

Promedios seguidos de la misma letra en columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey,

$P \leq 0.05$).

Los tratamientos revelaron patrones fisiológicos complejos donde la respuesta vegetal dependió de combinaciones específicas entre genotipo, solución nutritiva y potencial osmótico (Tabla 6). T9 (primera fecha) y T11 (segunda fecha) maximizaron AT, reforzando la sinergia entre esta colecta y Steiner (Steiner, 1984). Para NT y B T3 fue óptimo, con Steiner en la primera fecha y Arnon-Hoagland en la segunda, esta variación temporal sugiere que la capacidad de respuesta al estrés osmótico está mediada por cambios en la eficiencia de uso de nutrientes, un fenómeno documentado por Farooq *et al.* (2020) como parte de los mecanismos de aclimatación vegetal. El N varió notablemente: T6 en la primera fecha y T8 en la segunda. Esta plasticidad en la acumulación de nitrógeno evidencia la existencia de mecanismos de regulación fina que integran señales genotípicas, nutricionales y ambientales, esto coincide con lo reportado por Abid *et al.* (2016) y Jones *et al.* (2013) sobre la naturaleza multifactorial de la asimilación nitrogenada bajo condiciones de estrés.

Tabla 6. Efecto de los tratamientos

Interacciones	Primera fecha				Segunda fecha			
	AT (m)	NT	B (g)	N (%)	AT (m)	NT	B (g)	N (%)
T1	2.14 d	19.75 bc	665.1 c	4.63 cd	2.22 d	13.25 e	388.75 f	4.90 d
T2	2.46 b	18.5 cd	667.4 c	4.39 ef	2.14 e	15.00 d	713.27 c	5.26 d
T3	2.29 c	27.75 a	1023.92 a	4.72 c	2.05 e	19.75 bc	796.57 ab	6.09 c
T4	2.09 de	16.75 d	600.5 d	4.79 bc	1.83 gh	24.25 a	721.45 bc	6.56 b
T5	2.38 b	20.25 b	793.07 b	4.7 c	2.38 bc	14.50 e	570.85 e	6.58 b
T6	2.31 bc	22 b	776.6 b	5.3 a	1.86 fg	17.50 c	723.50 b	7.03 ab
T7	2.34 b	22 b	706.17 b	4.93 b	2.06 e	26.5 a	865.32 a	6.51 bc
T8	2.13 d	21.5 b	750.82 b	4.81 b	2.33 c	14.50 e	703.32 c	6.17 c
T9	2.03 e	8.5 g	341.97 fg	4.55 d	1.7 hi	13.75 e	306.05 f	5.18 d
T10	2.57 a	16 de	716.62 b	4.48 de	2.19 d	18.00 c	749.05 b	4.28 e
T11	2.39 b	13.25 ef	765.15 b	4.81 b	2.35 c	16.00 d	658.50 c	5.00 d
T12	2.48 ab	12.75 f	623.82 cd	4.65 c	2.53 a	16.25 d	652.05 cd	6.19 c
T13	2.27 c	18.5 cd	542.17 d	4.81 b	2.30 cd	17.25 cd	716.82 c	6.70 b
T14	2.20 cd	20.75 b	439.67 e	4.11 f	2.06 e	19.50 c	672.35 c	6.17 c
T15	2.54 a	16.5 d	706.07 bc	4.55 d	2.18 de	15.25 d	654.47 c	6.23 c

T16	2.24 c	16.25 d	544.92 d	4.21 f	2.49 ab	14.75 de	812.95 a	6.80 b
T17	2.33 b	16.75 d	557.5 d	4.65 c	2.20 d	14.50 e	640.37 de	7.50 a
T18	1.71 f	13 f	302.22 g	4.53 d	1.66 i	13.50 e	314.12 f	7.40 a
CV (%)	14.15	34.5	29.86	8.42	13.49	33.52	25.02	18.16

Promedios seguidos de la misma letra en columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey,

$P \leq 0.05$). CV = coeficiente de variación.

Estos resultados tienen implicaciones prácticas para *Vicia faba*. Potenciales osmóticos de -0.036 a -0.054 MPa⁻¹, combinados con soluciones nutritivas, optimizan crecimiento y biomasa, mientras que -0.072 MPa⁻¹ favorece el nitrógeno en ciertos casos. C10 es ideal para altura y C17 para biomasa y tallos, lo que permite seleccionar según objetivos agrícolas. El tezontle como sustrato ofrece estabilidad, aunque su rol en la retención de nutrientes requiere mayor estudio. Comparado con sistemas en suelo (Stoddard *et al.*, 2010), este diseño hidropónico reduce variables externas, identifica rangos óptimos aplicables al campo mediante ajustes en riego y fertilización. Futuras investigaciones podrían analizar efectos de la temperatura, interacciones con microorganismos fijadores de nitrógeno (Sprenst, 2001), y la escalabilidad de estos hallazgos en sistemas comerciales.

Conclusión

Este estudio demostró que el desempeño de *Vicia faba* en un sistema hidropónico depende de interacciones complejas entre el genotipo (C17 y C10), las soluciones

nutritivas (Arnon-Hoagland y Steiner) y el potencial osmótico (-0.036 a -0.072 MPa⁻¹). C17 destacó en biomasa, tallos y nitrógeno en la primera fecha de siembra, mientras que C10 favoreció la altura en la segunda, de esta forma se demuestran las respuestas varietales al estrés y al ambiente. Las soluciones nutritivas superaron al testigo en crecimiento, con Arnon-Hoagland donde se optimizó el nitrógeno en la segunda fecha. Potenciales osmóticos moderados (-0.036 a -0.054 MPa⁻¹) maximizaron altura, biomasa y tallos, mientras que -0.072 MPa⁻¹ favoreció el nitrógeno. Las interacciones confirmaron que estas variables modulan diferencialmente los resultados, con implicaciones para seleccionar cultivares y ajustar el manejo hídrico y nutricional en sistemas hidropónicos y de campo.

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo económico de CONACYT a través del programa Becas Nacional (Tradicional) 2022 con clave: 2022-000002-01NACF-04624.

Referencias bibliográficas

Abid, G., M'hamdi, M., Mingeot, D., Aouida, M., Aroua, I., Muhovski, Y., ... Jebara, M. (2016). Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence, antioxidant enzyme activities and gene expression patterns in faba bean (*Vicia faba* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4), 536–552.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1224857>

Alcántar-González, G. y Sandoval-Villa, M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial, 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. 155 p.

Blum, A. (2018). Plant breeding for stress environments. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781351075718>

Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives (2nd ed.). Sinauer Associates.

FAOSTAT. (2023). Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

Farooq, M., Romdhane, L., Al Sulti, M. K. R. A., Rehman, A., Al-Busaidi, W. M., & Lee, D.-J. (2020). Morphological, physiological and biochemical aspects of osmopriming-induced drought tolerance in lentil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(2), 176–186. <https://doi.org/10.1111/jac.12384>

Fitter, A. H., & Hay, R. K. M. (2012). Environmental physiology of plants (3rd ed.). Academic Press.

Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1938). *The water-culture method for growing plants without soil* (Circular No. 347). California Agricultural Experiment Station.

Jones, D. L., Clode, P. L., Kilburn, M. R., Stockdale, E. A., & Murphy, D. V. (2013). Competition between plant and bacterial cells at the microscale regulates the dynamics of nitrogen acquisition in wheat (*Triticum aestivum*). *New Phytologist*, 200(3), 796–807. <https://doi.org/10.1111/nph.12405>

Khan, H. R., Paull, J. G., Siddique, K. H. M., & Stoddard, F. L. (2010). Faba bean breeding for drought-affected environments: A physiological and agronomic perspective. *Field Crops Research*, 115(3), 279–286.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.003>

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: Ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th ed.). Springer.

Li, P., Zhang, Y., Wu, X., Liu, Y., Wang, J., & Li, H. (2018). Drought stress impact on leaf proteome variations of faba bean (*Vicia faba* L.) in the Qinghai–Tibet Plateau of China. *3 Biotech*, 8(110). <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1088-3>

Link, W., Abdelmula, A. A., von Kittlitz, E., Bruns, S., Riemer, H., & Stelling, D. (1999). Genotypic variation for drought tolerance in *Vicia faba*. *Plant Breeding*, 118(6), 477–484. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0523.1999.00412.x>

Mínguez, M. I., & Rubiales, D. (2021). Faba bean. In V. O. Sadras & D. F. Calderini (Eds.), *Crop physiology case histories for major crops* (pp. 452–481). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819194-1.00015-3>

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>

Mwanamwenge, J., Loss, S. P., Siddique, K. H. M., & Cocks, P. S. (1999). Effect of water stress during floral initiation, flowering and podding on the growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *European Journal of Agronomy*, 11(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00003-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00003-9)

Orozco Colin, N., Pérez López, D. de J., González Huerta, A., Franco Mora, O., Gutiérrez Rodríguez, F., Rubí Arriaga, M., Castañeda Vildózola, Á., & Balbuena Melgarejo, A. (2013). Identificación de poblaciones sobresalientes de haba colectadas en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(6), 921–932.

Salisbury, F. B., Ross, C. W., González Velázquez, V., Palacios Martínez, R., & Philip, G. (1994). Fisiología vegetal.

Shabala, S. N., & Lew, R. R. (2002). Turgor regulation in osmotically stressed *Arabidopsis* epidermal root cells: Direct support for the role of inorganic ion uptake as revealed by concurrent flux and cell turgor measurements. *Plant Physiology*, 129(1), 290–299. <https://doi.org/10.1104/pp.020005>

SIAP. (2023). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Estadísticas de la producción nacional de haba verde. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Sprent, J. I. (2001). Nodulation in legumes. Royal Botanic Gardens, Kew.

Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. En *Proceedings of the International Society for Soilless Culture* (pp. 633–649). Lunteren, The Netherlands.

Stoddard, F. L., Nicholas, A., Rubiales, D., Thomas, J., & Villegas, A. M. (2010). Integrated pest management in faba bean. *Field Crops Research*, 115(3), 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.002>

Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A., & Zeiger, E. (2023). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.

Turner, N. C. (2018). Turgor maintenance by osmotic adjustment: 40 years of progress. *Journal of Experimental Botany*, 69(13), 3223–3233. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery181>

Verslues, P. E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J., & Zhu, J.-K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic

stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 45(4), 523–539.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x>

V. DISCUSIÓN GENERAL

La presente investigación evaluó el efecto de dos soluciones nutritivas y cuatro potenciales osmóticos sobre el crecimiento y la acumulación de nitrógeno en dos cultivares de haba (*Vicia faba* L.). Los resultados permiten identificar condiciones óptimas para maximizar la biomasa y eficiencia nutrimental bajo condiciones hidropónicas.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten evidenciar la influencia significativa de las soluciones nutritivas y los niveles de potencial osmótico en el desarrollo de los cultivares de haba (*Vicia faba* L.), así como su impacto diferencial entre fechas de siembra. En términos generales, el rendimiento en altura, número de tallos, biomasa y concentración de nitrógeno total estuvo fuertemente condicionado por las interacciones entre factores, lo que resalta la importancia del manejo específico del sistema hidropónico en función del genotipo y las condiciones abióticas.

En cuanto a los efectos individuales, las colectas respondieron de manera diferencial con respecto a la fecha de siembra. En la primera fecha, la colecta C17 presentó valores superiores a C10 en número de tallos (NT), biomasa (B) y nitrógeno (N), aunque no hubo diferencias en altura total (AT). Esto indica una mayor capacidad de acumulación de recursos, posiblemente relacionada con una tolerancia genética al estrés osmótico, como señalan Khan *et al.* (2010). Este comportamiento podría corresponder a una estrategia de crecimiento enfocada en generar más biomasa que en aumentar la altura, similar a lo descrito por Munns y Tester (2008) en plantas sometidas a estrés moderado. Por otro lado, en la segunda fecha de siembra, C10 mostró un mayor valor en AT, sin diferencias en las demás variables, lo cual podría deberse a condiciones ambientales como el fotoperiodo o la temperatura, según lo mencionado por Khan *et al.* (2010); Torabian *et al.* (2024).

Respecto al factor cultivar, se observó un comportamiento diferenciado entre fechas. En la primera fecha de siembra, el cultivar C17 mostró superioridad en biomasa, número de tallos y contenido de nitrógeno, lo cual coincide con lo reportado por Desoky *et al.* (2020), quienes señalaron que el rendimiento fisiológico y bioquímico en *Vicia faba* puede depender del cultivar bajo condiciones de estrés osmótico. Lo anterior debido al desgaste metabólico y la diferenciada respuesta entre cultivares de la misma especie. En contraste, en la segunda fecha, el cultivar C10 mostró mayor altura total, sin diferencias estadísticas en las otras variables, lo

cual sugiere un efecto fenológico y de adaptación temporal, como también fue descrito por Papastylianou *et al.* (2021) al estudiar genotipos de haba en diferentes ambientes de cultivo. Las diferencias observadas entre cultivares y fechas de siembra podrían estar relacionadas con las variaciones ambientales, especialmente en la temperatura, precipitación y radiación solar, ocurridas durante el periodo entre ambas fechas, que fue de aproximadamente un mes. Además, cada cultivar presenta un grado distinto de adaptación a las condiciones agroclimáticas de la región de donde fue colectado, lo cual también podría influir en su respuesta fisiológica y de crecimiento.

Con relación al efecto de las soluciones nutritivas, ambas formulaciones, Steiner y Arnon-Hoagland, superaron significativamente al testigo en suelo para las variables de crecimiento en ambas fechas de siembra. Estos resultados concuerdan con lo documentado por Sambo *et al.* (2019), quienes encontraron que el suministro controlado de nutrientes en hidroponía promueve un mayor desarrollo vegetativo y acumulación de biomasa en leguminosas. Sin embargo, la solución Arnon-Hoagland mostró una ventaja en la acumulación de nitrógeno total en la segunda fecha, lo cual puede atribuirse a la mayor proporción de amonio y disponibilidad de macronutrientes esenciales, lo que ha sido señalado como determinante en el metabolismo nitrogenado por Xu *et al.* (2024). A su vez, el ion amonio (NH_4^+) suele ser más fácilmente asimilado por las plantas en comparación con el ion nitrato (NO_3^-), debido a que la ruta metabólica que sigue para su incorporación al metabolismo vegetal requiere menos gasto energético.

Estudios previos han mostrado la relación entre el balance nutrimental y la regulación osmótica en *Vicia faba*, Desoky *et al.* (2020) documentaron que un ajuste osmótico limitado bajo salinidad reduce la turgencia y afecta el crecimiento; mientras que Katerji *et al.* (2011) describen cómo la fijación de nitrógeno y productividad dependen del estado hídrico del cultivo. Asimismo, Ghouili *et al.* (2021) demostraron que la regulación de azúcares solubles y la expresión génica en haba bajo estrés osmótico son sensibles a la calidad nutricional, lo que refuerza que un balance adecuado de nutrientes es determinante frente a variaciones osmóticas.

En relación con el potencial osmótico, los tratamientos con soluciones nutritivas diluidas a -0.036 y -0.054 MPa^{-1} promovieron un mayor desarrollo de biomasa y contenido de nitrógeno respecto al testigo. Esto sugiere que niveles moderados de estrés hídrico inducen una respuesta adaptativa positiva, lo cual ha sido reportado también por Simkova *et al.* (2024), quienes observaron que un déficit hídrico controlado puede mejorar la eficiencia en la asimilación de

nutrientes en el haba. Cabe destacar que el valor óptimo del potencial osmótico varió entre fechas de siembra y entre variables evaluadas, lo que confirma que la respuesta fisiológica es altamente dinámica. El dinamismo observado en las respuestas al potencial osmótico podría estar relacionado con la capacidad homeostática inherente de cada cultivar, así como con su interacción con las condiciones agroclimáticas particulares de cada fecha de siembra. Además, es importante considerar que el déficit hídrico moderado actúa como un estrés fisiológico que puede inducir la síntesis y acumulación de azúcares solubles, los cuales desempeñan un papel clave en la osmorregulación y en la protección celular frente a condiciones adversas. Estos efectos destacan la importancia crítica del manejo osmótico, pues un estrés osmótico moderado puede inducir mecanismos fisiológicos de adaptación como acumulación de azúcares y regulación estomal (Ghouili *et al.*, 2021).

También se observa una disminución progresiva en la mayoría de las variables conforme se incrementa el potencial osmótico. Esto es esperable porque en condiciones de alta salinidad la absorción iónica adecuada es indispensable para mantener el crecimiento. La salinidad elevada altera la homeostasis de iones como Na^+ , K^+ y Ca^{2+} , lo que afecta la función enzimática, la turgencia celular y el metabolismo general. Para contrarrestar esto, las plantas desarrollan mecanismos adaptativos (como transporte selectivo y compartición vacuolar) para conservar un balance iónico compatible con un rendimiento óptimo. Estas estrategias incluyen expulsión de Na^+ , acumulación de K^+ y regulación genética de canales y antiportadores iónicos (como SOS1, HKT y NHX), procesos esenciales para preservar la fisiología en ambientes salinos (Amin *et al.*, 2021; Balasubramaniam *et al.*, 2023).

En las interacciones dobles, el análisis cultivar \times solución nutritiva mostró una marcada respuesta específica de los genotipos frente a las soluciones. Por ejemplo, C10 se asoció con mayor altura en interacción con la solución Steiner, mientras que C17 mostró mayor biomasa y número de tallos con Arnon-Hoagland. Esta diferenciación entre genotipos y tipo de nutrición fue también documentada por Amoako *et al.* (2023), quienes encontraron que diferentes cultivares de *Vicia faba* responden de manera variable a soluciones nutritivas en sistemas sin suelo, en función de su genética y arquitectura radicular.

Por otra parte, la interacción cultivar \times potencial osmótico destacó al cultivar C17 como más tolerante en términos de biomasa y número de tallos bajo un potencial de -0.054 MPa^{-1} , resultado alineado con lo observado por Tavakkoli *et al.* (2024), quienes identificaron

respuestas adaptativas en haba ligadas al genotipo cuando se enfrentan a niveles moderados de estrés osmótico.

En la interacción solución × potencial osmótico, la solución Arnon-Hoagland combinada con potenciales intermedios (P2 y P3) favoreció la mayoría de las variables, especialmente nitrógeno y biomasa. Esto coincide con evidencia de que la calidad y composición de la solución nutritiva, junto con el gradiente osmótico, determinan la eficiencia en la asimilación de nitrógeno bajo condiciones de estrés osmótico o salino. Por ejemplo, estudios en haba y otras leguminosas han mostrado que el suministro equilibrado de nutrientes puede facilitar el cetois osmótico y mantener la simbiosis y nutrición nitrogenada cuando se usa un gradiente osmótico realista (Ghouili *et al.*, 2021; Tavakkoli *et al.*, 2024; Desoky *et al.*, 2021). Esto se debe principalmente al esfuerzo metabólico que debe realizar la planta para absorber e incorporar el nitrógeno, particularmente en su forma nítrica (NO_3^-), la cual requiere un proceso de reducción antes de ser asimilada, lo que implica un mayor consumo energético en comparación con la forma amoniacal (NH_4^+) que en conjunto con un potencial osmótico moderado mejoran la respuesta de las plantas. Esto sugiere una respuesta cultivar-específica según la solución y el entorno, donde cada combinación favorece variables distintas aeróbicamente.

En cuanto a los efectos de los tratamientos se observó que las combinaciones específicas, como T1 (altura) o T6 (nitrógeno total), ofrecieron las respuestas más favorables. Estas combinaciones revelan la necesidad de adaptar el manejo hidropónico al cultivar específico y a las condiciones osmóticas deseadas, una idea que se encuentra respaldada por los trabajos recientes de Balko *et al.* (2023), quienes recomiendan estrategias de nutrición diferenciadas según el genotipo y el estado hídrico del sustrato para maximizar la eficiencia agronómica en leguminosas. Aunque existen soluciones nutritivas denominadas “universales”, es fundamental investigar y desarrollar fórmulas específicas adaptadas a cada cultivo y a las condiciones agroclimáticas particulares de cada región. Esto permite optimizar tanto el riego como la fertilización, mejorando la eficiencia en el uso de recursos y el rendimiento de los cultivos.

Sorprendentemente, el contenido de nitrógeno no fue más bajo en los testigos sino en el tratamiento P1, para ambas soluciones. Esto puede explicarse por la capacidad de *Vicia faba* para fijar nitrógeno atmosférico. Como se ha documentado ampliamente mediante técnicas isotópicas y en condiciones de intercalado o cultivos sin fertilización, el haba puede derivar

entre un 50 % y 70 % de su nitrógeno del aire, dependiendo del genotipo y el sistema de cultivo (Klippenstein *et al.*, 2022; Abu *et al.*, 2024).

Aunque el nitrógeno es esencial para el crecimiento y metabolismo vegetal, el exceso de N puede ser perjudicial, provocando toxicidad, reducción del rendimiento y efectos adversos fisiológicos. Por ejemplo, niveles elevados de nitrógeno reducen la floración y productividad, afectan la eficiencia del uso del agua, dañan pelos radiculares y promueven susceptibilidad a plagas (Schild *et al.*, 2009). También se ha demostrado que dosis excesivas de nitrógeno en cultivos como arroz inhiben el crecimiento de raíces y reducen biomasa (Xin *et al.*, 2021). Estas evidencias coinciden con observaciones clásicas de toxicidad por nitrógeno en plantas, donde se altera el balance metabólico y la función enzimática (Farhan *et al.*, 2024; Martínez-Dalmau *et al.*, 2021). Cuando la absorción de nitrógeno excede la capacidad de asimilación de la planta, ésta acumula niveles elevados de NO_3^- y NH_4^+ , lo que puede causar salinización secundaria del medio y toxicidad metabólica. Esto impacta negativamente en el crecimiento, la arquitectura radical y el balance iónico celular (Britto & Kronzucker, 2002). Estudios posteriores también coinciden en que altas concentraciones de amonio generan síntomas como clorosis, reducción de biomasa y cambios fisiológicos adversos que afectan el rendimiento global (Britto & Kronzucker, 2002; Bittsánszky *et al.*, 2015).

VI. CONCLUSIONES

El presente estudio profundiza en la fisiología y dinámica de crecimiento de dos cultivares de haba bajo condiciones controladas de hidroponía, explorando el efecto combinado de dos soluciones nutritivas y cuatro niveles de potencial osmótico en variables clave como altura total, número de tallos, biomasa y concentración de nitrógeno total. Los resultados brindan nuevas perspectivas agronómicas para el diseño de sistemas de cultivo eficientes, resilientes y adaptados a escenarios climáticos cada vez más restrictivos, en especial frente al estrés hídrico. En términos generales, se puede afirmar que el manejo preciso del potencial osmótico y la formulación adecuada de soluciones nutritivas en sistemas hidropónicos permite no solo optimizar el crecimiento vegetal, sino también mejorar la acumulación de nutrientes, particularmente el nitrógeno, que es un componente esencial del metabolismo de las plantas. Lo anterior tiene implicaciones directas en la producción de biomasa, rendimiento comercial y calidad nutricional del haba

.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abahri, A. S. T. (2015). *Effects of nutrients and salinity on yields, growth, and nutrients distribution of faba beans grown in hydroponics system* [Tesis de maestría, An-Najah National University]. An-Najah Institutional Repository. <https://repository.najah.edu/server/api/core/bitstreams/4cf35126-12cd-44df-ad2d-dde2db5891a3/content>
- Abebe, B., Dechassa, N., Tana, T., Laekemariam, F., & Alemayehu, Y. (2021). Soil fertility management practices for faba bean (*Vicia faba* L.) production in Wolaita zone, Southern Ethiopia. *Agronomía Colombiana*, 39(2), 252–264. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n2.93014>
- Abu, G., Adetimirin, V., Fatokun, C., Keneni, G., & Assefa, F. (2024). Genotypic variation in nitrogen fixation characteristics in faba bean (*Vicia faba* L.) under contrasting phosphorus fertilizer regimes. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7(4), e70009. <https://doi.org/10.1002/agg2.70009>
- Adhikari, K. N., Khazaei, H., Ghaouti, L., Maalouf, F., Vandenberg, A., Link, W., & O’Sullivan, D. M. (2021). Conventional and molecular breeding tools for accelerating genetic gain in faba bean (*Vicia faba* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 744259. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.744259>
- Alcántar-González, G. y Sandoval-Villa, M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial, 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. 155 p.
- Ali Ouji, A., Abid, G., Aouida, M., Aroua, I., Muhovski, Y., Messaoud, R. B., Jebara, M., & Jebara, S. H. (2011). Comparative study of growth, nodulation and physiological behavior of five faba bean genotypes (*Vicia faba* L.) under saline conditions. *African Journal of Biotechnology*, 10(65), 14589–14598. <https://doi.org/10.5897/AJB11.1818>
- Amin, I., Rasool, S., Mir, M. A., Wani, W., Masoodi, K. Z., & Ahmad, P. (2021). Ion homeostasis for salinity tolerance in plants: A molecular approach. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 578–594. <https://doi.org/10.1111/ppl.13185>

- Amoako, F. K., Jillani, G., Sulieman, S., & Mühlhling, K. H. (2023). Faba bean (*Vicia faba* L.) varieties reveal substantial and contrasting organic phosphorus use efficiencies (PoUE) under symbiotic conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(6), 1127–1142. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300198>
- Aouar-Sadli, M., Louadi, K., & Doumandji, S.-E. (2018). Pollination of the broad bean (*Vicia faba* L. var. major) (Fabaceae) by wild bees and honey bees (Hymenoptera: Apoidea) and its impact on the seed production in the Tizi-Ouzou area (Algeria). *Global Journal of Food and Agribusiness Management*, 2(9), 1–7. <https://26journals.com/articles/6083351701092018>
- Asher, C. J., & Edwards, D. G. (1983). Modern solution culture techniques. En A. Pirson & M. H. Zimmerman (Eds.), *Encyclopedia of plant physiology* (Vol. 15-A, pp. 94–119). Springer.
- Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmacili, N., & Zhang, H. (2023). Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 12(12), 2253. <https://doi.org/10.3390/plants12122253>
- Balko, C., Torres, A. M., & Gutierrez, N. (2023). Variability in drought stress response in a panel of 100 faba bean genotypes. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1236147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1236147>
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía* (1.^a ed.). Editorial de la Universidad de la Plata.
- Bittsánszky, A., Pilinszky, K., Gyulai, G., & Komives, T. (2015). Overcoming ammonium toxicity. *Plant Science*, 231, 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.12.005>
- Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant, Cell & Environment*, 40(1), 4–10. <https://doi.org/10.1111/pce.12800>
- Brar, P. S., Bhardwaj, G., & Bhardwaj, M. (2023). Broad bean. En A. D. Ranga & J. Singh (Eds.), *Underutilized vegetable crops: Importance and cultivation* (pp. 27–34). Jaya Publishing House.
- Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2002). NH₄⁺ toxicity in higher plants: A critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159(6), 567–584. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0774>
- CABI. (2019). *Vicia faba* (faba bean). CABI Compendium. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.56364>

- Caputo, S. (2022). History, techniques and technologies of soil-less cultivation. En *Small Scale Soil-less Urban Agriculture in Europe* (pp. 45–86). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99962-9_4
- Caracuta, V., Barzilai, O., Khalaily, H., Milevski, I., Paz, Y., Vardi, J., Regev, L., & Boaretto, E. (2015). The onset of faba bean farming in the Southern Levant. *Scientific Reports*, 5, Article 14370. <https://doi.org/10.1038/srep14370>
- Claudia. (s.f.). From Babylon to beyond: The history of hydroponics. Hydroponic Horizons. <https://hydroponichorizons.com/history-of-hydroponics/>
- Coïc, Y. (1973). Les problèmes de composition et de concentration des solutions nutritives en culture sans sol. En *Proceedings of the 3rd International Congress on Soilless Culture* (pp. 158–164). Sassari, Italia.
- Crepón, K., Marget, P., Peyronnet, C., Carrouée, B., Arese, P., & Duc, G. (2010). Nutritional value of faba bean (*Vicia faba* L.) seed for feed and food. *Field Crops Research*, 115(3), 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.016>
- Desoky, E. M., Mansour, E., El-Sobky, E. E. A., Abdul-Hamid, M. I., Taha, T. F., Elakkad, H. A., Arnaout, S. M. A. I., Eid, R. S. M., El-Tarabily, K. A., & Yasin, M. A. T. (2021). Physio-biochemical and agronomic responses of faba beans to exogenously applied nano-silicon under drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 637783. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.637783>
- Desoky, E. M., Mansour, E., Yasin, M. A. T., El-Sobky, E. E. A., & Rady, M. M. (2020). Improvement of drought tolerance in five different cultivars of *Vicia faba* with foliar application of ascorbic acid or silicon. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(2), e0802. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-16122>
- Desouky, A. F., Ahmed, A. H. H., Stützel, H., Jacobsen, H.-J., Pao, Y.-C., & Hanafy, M. S. (2021). Enhanced abiotic stress tolerance of *Vicia faba* L. plants heterologously expressing the PR10a gene from potato. *Plants*, 10(1), 173. <https://doi.org/10.3390/plants10010173>
- Dhull, S. B., Kidwai, M. K., Siddiq, M., & Sidhu, J. (2022). Faba (broad) bean production, processing, and nutritional profile. En M. Siddiq & M. A. Uebersax (Eds.), *Dry beans and pulses* (pp. 359–381). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119776802.ch14>

- Drop Info. (2018, abril 14). Hoagland solution. *Blogger*.
<https://yourdropinfo.blogspot.com/2018/04/hoagland-solution.html>
- Edwards, J. (2016, March 24). History of hydroponics, Part I: The beginnings of water culture. *Garden Culture Magazine*. <https://gardenculturemagazine.com/history-of-hydroponics-part-i-the-beginnings-of-water-culture>
- El-Dawy, M. E., Gherbawy, Y. A., & Hussein, M. A. (2021). Morphological, molecular characterization, plant pathogenicity and biocontrol of *Cladosporium* complex groups associated with faba beans. *Scientific Reports*, 11.
- FAOSTAT. (2025). Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Farhan, M., Sathish, M., Kiran, R., Mushtaq, A., Baazeem, A., Hasnain, A., Hakim, F., Naqvi, S. A. H., Mubeen, M., Iftikhar, Y., Abbas, A., Hassan, M. Z., & Moustafa, M. (2024). Plant nitrogen metabolism: Balancing resilience to nutritional stress and abiotic challenges. *Phyton - International Journal of Experimental Botany*, 93(3), 581–609.
<https://doi.org/10.32604/phyton.2024.046857>
- Ghouili, E., Sassi, K., Jebara, M., Hidri, Y., Ouertani, R. N., Muhovski, Y., Harzalli Jebara, S., El Ayed, M., Abdelkarim, S., Chaieb, O., Jallouli, S., Kalleli, F., M'hamdi, M., Souissi, F., & Abid, G. (2021). Physiological responses and expression of sugar associated genes in faba bean (*Vicia faba* L.) exposed to osmotic stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(1), 135–150. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00935-1>
- Goh, Y. S., Hum, Y. C., Lee, Y. L., Lai, K. W., Yap, W.-S., & Tee, Y. K. (2023). A meta-analysis: Food production and vegetable crop yields of hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 321, 112339. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112339>
- Gutiérrez, N., Ávila, C. M., Moreno, M. T., & Torres, A. M. (2008). Development of SCAR markers linked to *zt-2*, one of the genes controlling absence of tannins in faba bean. *Australian Journal of Agricultural Research*, 59(4), 365–373. <https://doi.org/10.1071/AR07241>
- Hao, D.-L., Zhou, J.-Y., Li, L., Qu, J., Li, X.-H., Chen, R.-R., Kong, W.-Y., Li, D.-D., Li, J.-J., Guo, H.-L., Liu, J.-X., Zong, J.-Q., & Chen, J.-B. (2023). An appropriate ammonium: nitrate ratio promotes the growth of centipedegrass: Insight from physiological and micromorphological

analyses. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1324820.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1324820>

Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil* (Circular No. 347, Rev. ed.). College of Agriculture, University of California.
<https://archive.org/details/watercultureme3450hoag>

Jayakodi, M., Golicz, A. A., Kreplak, J., Fechete, L. I., Angra, D., Bednář, P., Bornhofen, E., Zhang, H., Boussageon, R., Kaur, S., ... & Andersen, S. U. (2023). The giant diploid faba genome unlocks variation in a global protein crop. *Nature*, 615(7953), 652–659.
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05791-5>

Juárez Hernández, M. de J., Baca Castillo, G. A., Aceves Navarro, L. A., Sánchez García, P., Tirado Torres, J. L., Sahagún Castellanos, J., & Colinas De León, M. T. (2006). Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. *Interciencia*, 31(4), 246–253. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33911503>

Karkanis, A., Ntatsi, G., Lepse, L., Fernández, J. A., Vågen, I. M., Rewald, B., Alsiņa, I., Kronberga, A., Balliu, A., Olle, M., Bodner, G., Dubova, L., Rosa, E., & Savvas, D. (2018). Faba bean cultivation –Revealing novel managing practices for more sustainable and competitive European cropping systems. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1115.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01115>

Katerji, N., Mastrorilli, M., Lahmer, F. Z., Maalouf, F., & Oweis, T. (2011). Faba bean productivity in saline-drought conditions. *European Journal of Agronomy*, 35(1), 2–12.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.03.001>

Katerji, N., Mastrorilli, M., Hamdy, A., & van Hoorn, J. W. (2002). Water status and osmotic adjustment of broad-bean (*Vicia faba* L.) in response to soil salinity. *Acta Horticulturae*, 573, 305–310. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.573.35>

Khan, A., Pan, X., Najeeb, U., Tan, D. K. Y., Fahad, S., Zahoor, R., & Luo, H. (2018). Coping with drought: Stress and adaptive mechanisms, and management through cultural and molecular alternatives in cotton as vital constituents for plant stress resilience and fitness. *Biological Research*, 51(47), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40659-018-0198-z>

- Khan, H. R., Paull, J. G., Siddique, K. H. M., & Stoddard, F. L. (2010). Faba bean breeding for drought-affected environments: A physiological and agronomic perspective. *Field Crops Research*, *115*(3), 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.003>
- Khazaei, H., O’Sullivan, D. M., Stoddard, F. L., Adhikari, K. N., Paull, J. G., Schulman, A. H., Andersen, S. U., & Vandenberg, A. (2021). Recent advances in faba bean genetic and genomic tools for crop improvement. *Legume Science*, *3*(3), e75. <https://doi.org/10.1002/leg3.75>
- Klippenstein, S. R., Khazaei, H., Vandenberg, A., & Schoenau, J. (2022). Nitrogen and phosphorus uptake and nitrogen fixation estimation of faba bean in western Canada. *Agronomy Journal*, *114*(1), 811–824. <https://doi.org/10.1002/agj2.20945>
- Kosev, V., & Georgieva, N. (2023). Evaluation of the genetic diversity in broad bean (*Vicia faba* L.) accessions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, *29*.
- Li, X., & Yang, Y. P. (2014). A novel perspective on seed yield of broad bean (*Vicia faba* L.): Differences resulting from pod characteristics. *Scientific Reports*, *4*, Article 6859. <https://doi.org/10.1038/srep06859>
- Maalouf, F., Hu, J., O’Sullivan, D. M., Zong, X., Hamwieh, A., Kumar, S., & Baum, M. (2019). Breeding and genomics status in faba bean (*Vicia faba*). *Plant Breeding*, *138*(4), 465–473. <https://doi.org/10.1111/pbr.12644>
- Ma, D., Teng, W., Yi, B., Lin, Y., Pan, Y., & Wang, L. (2023). Effects of the nitrate and ammonium ratio on plant characteristics and *Erythralum scandens* Bl. substrates. *PLoS ONE*, *18*(8), e0289659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289659>
- Marcińska, I., Czyczyło-Mysza, I., Skrzypek, E., Filek, M., Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Janowiak, F., Hura, T., Dziurka, M., Dziurka, K., Nowakowska, A., & Quarrie, S. A. (2012). Impact of osmotic stress on physiological and biochemical characteristic in drought-susceptible and drought-resistant wheat genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*, *35*(2), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1088-6>
- Martínez-Dalmau, J., Berbel, J., & Ordóñez-Fernández, R. (2021). Nitrogen fertilization. A review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses. *Sustainability*, *13*(10), Article 5625. <https://doi.org/10.3390/su13105625>

- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2^a ed.). Academic Press.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., van Os, E., Anseeuw, D., Van Havermaet, R., & Junge, R. (2019). Hydroponic technologies. En L. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, & G. Burnell (Eds.), *Aquaponics food production systems* (pp. 77–110). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4
- 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>
- Nguyen, N. T., McInturf, S. A., & Mendoza-Cózatl, D. G. (2016). Hydroponics: A versatile system to study nutrient allocation and plant responses to nutrient availability and exposure to toxic elements. *Journal of Visualized Experiments*, 113, Article e54317. <https://doi.org/10.3791/54317>
- Narisepalli Venkatasai, N., Shetty, D. N., Vinay, C. M., Sekar, M., Muthusamy, A., & Rai, P. S. (2025). A comprehensive review of factors affecting growth and secondary metabolites in hydroponically grown medicinal plants. *Planta*, 261(3), 48. <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04619-y>
- O’Sullivan, D. M., & Angra, D. (2016). Advances in faba bean genetics and genomics. *Frontiers in Genetics*, 7, Article 150. <https://doi.org/10.3389/fgene.2016.00150>
- Papastylianou, P., Vlachostergios, D. N., Dordas, C., Tigka, E., Papakaloudis, P., Kargiotidou, A., Pratsinakis, E., Koskosidis, A., Pankou, C., Kousta, A., Mylonas, I., Tani, E., Abraham, E. M., Karatassiou, M., & Kostoula, S. (2021). Genotype × environment interaction analysis of faba bean (*Vicia faba* L.) for biomass and seed yield across different environments. *Sustainability*, 13(5), 2586. <https://doi.org/10.3390/su13052586>
- Patil, S. T., Kadam, U. S., Mane, M. S., Mahale, D. M., & Dekale, J. S. (2020). Hydroponic nutrient solution: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(5), 2095–2099. <https://www.phytojournal.com/archives/2020/vol9issue5/PartAC/9-5-347-731.pdf>
- Péllissier, P.-M., Parizot, B., Jia, L., De Knijf, A., Goossens, V., Gantet, P., Champion, A., Audenaert, D., Xuan, W., Beeckman, T., & Motte, H. (2024). Nitrate and ammonium, the yin and yang of nitrogen uptake: A time-course transcriptomic study in rice. *Frontiers in Plant Science*, 15, Article 1343073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1343073>

- Petruzzello, M. (Ed.). (2025, May 23). Broad bean (*Vicia faba*). *Encyclopaedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/plant/broad-bean>
- Ranganathapura Sathyanarayana, S., Gangadhar, W. V., Badrinath, M. G., Ravindra, M. R., & Shriramrao, A. U. (2022). Hydroponics: An intensified agriculture practice to improve food production. *Reviews in Agricultural Science*, *10*, 101–114.
https://doi.org/10.7831/ras.10.0_101
- Redden, R., Paull, J., Zong, X., Sass, O., Yang, T., & Ling, L. (2014). Faba bean. En M. Singh, I. S. Bisht, & M. Dutta (Eds.), *Broadening the genetic base of grain legumes* (pp. 75–93). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-81-322-2023-7_4
- Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., & Cesco, S. (2019). Hydroponic solutions for soilless production systems: Issues and opportunities in a smart agriculture perspective. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 923. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>
- Sánchez-Bernal, E. I., Ortega-Escobar, H. M., Can-Chulim, Á., Galicia-Jiménez, M. M., & Camacho-Escobar, M. A. (2019). Evaluación de potenciales osmóticos en suelos y aguas costeros de Oaxaca, México, mediante ecuaciones de predicción. *Acta Universitaria*, *29*(1), 1–16.
<https://doi.org/10.15174/au.2019.2125>
- Sattell, R., Dick, R., & McGrath, D. M. (1998). Fava bean (*Vicia faba* L.) (EM 8697). Oregon State University Extension Service.
https://ir.library.oregonstate.edu/concern/open_educational_resources/7w62f8633
- Schafer, E. D. (2024). Hydroponics. EBSCO Research Starters. <https://www.ebsco.com/research-starters/agriculture-and-agribusiness/hydroponics>
- Schild, J. A., Hergert, G. W., & Gaussoin, R. E. (2009). *Fertilizer use in home landscapes* (G1941). University of Nebraska–Lincoln Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources.
<https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1941/2009/pdf/view/g1941-2009.pdf>
- Segal, B. G. (1989). *Chemistry: Experiment and theory*. Wiley.

- SIAP. (2025). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Estadísticas de la producción nacional de haba verde. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Simkova, K., Veberic, R., Grohar, M. C., Pelacci, M., Smrke, T., Ivancic, T., Medic, A., Cvelbar Weber, N., & Jakopic, J. (2024). Changes in the aroma profile and phenolic compound contents of different strawberry cultivars during ripening. *Plants*, *13*(10), 1419. <https://doi.org/10.3390/plants13101419>
- Singh, A. K., Baharati, R. C., Manibhushan, N. C., & Pedpati, A. (2013). An assessment of faba bean (*Vicia faba* L.) current status and future prospect. *African Journal of Agricultural Research*, *8*(48), 6634–6641. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7236>
- Singh, A. K., Bharadwaj, C., & Kumar, S. (2013). Biology of *Vicia faba* L. (faba bean). Department of Biotechnology, Ministry of Science and Technology, Government of India. <https://envfor.nic.in/sites/default/files/biology-vicia-faba.pdf>
- Smith, G. S., Johnston, C. M., & Cornforth, I. S. (1983). Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture. *New Phytologist*, *94*(4), 537–548. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1983.tb04863.x>
- Stoddard, F. L., Nicholas, A., Rubiales, D., Thomas, J., & Villegas, A. M. (2010). Integrated pest management in faba bean. *Field Crops Research*, *115*(3), 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.002>
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, *15*, 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Steiner, A. A. (1966). The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant and Soil*, *24*, 434–466.
- Steiner, A. A. (1968). Soilless culture. En *Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute* (pp. 324–341). Florence, Italy.
- Steiner, A. A. (1973). The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. En *Proceedings of the 3rd International Congress on Soilless Culture*.

- Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. En *Proceedings of the 5th International Congress on Soilless Culture* (pp. 83–94). Wageningen, Países Bajos.
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. En *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture* (pp. 633–649).
- Swamy, K. R. M. (2024). Origin, distribution, taxonomy, botanical description, genetics and cytogenetics, genetic diversity and breeding of broad bean (*Vicia faba* L.). *International Journal of Current Research*, 16(5), 28531–28565. <https://doi.org/10.24941/ijcr.47292.05.2024>
- Sylvia. (2017, July 31). Broad beans – *Vicia faba*. Health Benefits Times. <https://www.healthbenefitstimes.com/broad-beans/>
- Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A., & Zeiger, E. (2023). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- Tavakkoli, E., Watts-Williams, S. J., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2024). Eliciting the aboveground physiological regulation that underlies salinity tolerance in faba bean (*Vicia faba* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 226, Article 105849. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105849>
- Tavakkoli, E., Paull, J., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2012). Comparing genotypic variation in faba bean (*Vicia faba* L.) in response to salinity in hydroponic and field experiments. *Field Crops Research*, 127, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.10.016>
- Torabian, S., Zakeri, H., & Farhangi-Abri, S. (2024). Optimizing faba bean cultivation: Assessing varietal performance in spring and fall. *Frontiers in Agronomy*, 6, Article 1474528. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1474528>
- van Delden, S. H., Nazarideljou, M. J., & Marcelis, L. F. M. (2020). Nutrient solutions for *Arabidopsis thaliana*: A study on nutrient solution composition in hydroponics systems. *Plant Methods*, 16, Article 72. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00606-4>
- Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A review on hydroponics and the technologies associated for

medium- and small-scale operations. *Agriculture*, 12(5), 646.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>

- Volpelli, L. A., Comellini, M., Masoero, F., Moschini, M., Lo Fiego, D. P., & Scipioni, R. (2010). Faba beans (*Vicia faba*) in dairy cow diet: Effect on milk production and quality. *Italian Journal of Animal Science*, 9(27), 138–144. <https://doi.org/10.4081/ijas.2010.e27>
- Xu, T., Wang, Z., Wang, Z., Guo, M., Wang, X., He, X., Wang, J., Rahman, S. U., Bourhia, M., Alsahli, A. A., & Zhang, Y. (2024). Effects of nitrate- and ammonium- nitrogen on anatomical and physiological responses of *Catalpa bungei* under full and partial root-zone drought. *BMC Plant Biology*, 24, 217. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04874-3>
- Xin, W., Zhang, L., Gao, J., Zhang, W., Yi, J., Zhen, X., Bi, C., He, D., Liu, S., & Zhao, X. (2021). Adaptation mechanism of roots to low and high nitrogen revealed by proteomic analysis. *Rice*, 14, Article 5. <https://doi.org/10.1186/s12284-020-00443-y>
- Yang, Z., Yan, H., Liu, H., Yang, L., Mi, G., & Wang, P. (2025). Enhancing crop nitrogen efficiency: The role of mixed nitrate and ammonium supply in plant growth and development. *Biology*, 14(5), Article 546. <https://doi.org/10.3390/biology14050546>
- Yu, B., Chao, D.-Y., & Zhao, Y. (2024). How plants sense and respond to osmotic stress. *Journal of Integrative Plant Biology*, 66(2), 277–302. <https://doi.org/10.1111/jipb.13622>
- Zayed, O., Hewedy, O. A., Abdelmoteleb, A., Ali, M., Youssef, M. S., Roumia, A. F., Seymour, D., & Yuan, Z.-C. (2023). Nitrogen journey in plants: From uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction. *Biomolecules*, 13(10), 1443. <https://doi.org/10.3390/biom13101443>
- Zong, X., Yang, T., & Liu, R. (2019). Faba bean (*Vicia faba* L.) breeding. En J. M. Al-Khayri, S. M. Jain, & D. V. Johnson (Eds.), *Advances in plant breeding strategies: Legumes* (pp. 245–286). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3_7
- Zhou, C., Wei, Q., Liu, Z., Yang, F., & Peng, S. (2020). Establishment and optimization of a hydroponic system for root morphological and nutritional analysis of citrus. *Scientia Agricola*, 77(4). <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0261>