

Desarrollo de chayote verde liso [*Sechium edule* (Jacq.) Sw. var. *virens levis*] y quelite blanco silvestre (*Amaranthus hybridus* L.) en un sistema acuapónico con tilapia (*Oreochromis niloticus*) y acocil (*Procambarus veracruzanus*)

Development of smooth green chayote [*Sechium edule* (Jacq.) Sw. var. *virens levis*] and wild white quelite (*Amaranthus hybridus* L.) in an aquaponic system with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and crayfish (*Procambarus veracruzanus*)

Ricardo Serna-Lagunes¹ , Gabriel de la Luz-Morales¹ , Miguel Cebada-Merino^{1*} , Miguel Á. García-Martínez¹ , Karina P. Bañuelos-Hernández¹ , José Luis del Rosario-Arellano¹ , Otto R. Leyva-Ovalle¹ , Pablo Andres-Meza¹ 

1 Programa de Posgrado Maestría en Horticultura Tropical, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana. Calle Josefa Ortiz de Domínguez S/N Col. Centro, Peñuela, Municipio de Amatlán de Los Reyes, Veracruz, México. CP. 94945.

ABSTRACT:

A sustainable alternative for the use of biological resources with potential for local use is through multitrophic production. The growth of *Sechium edule* var. *virens levis* and *Amaranthus hybridus* was evaluated, as were the physicochemical water parameters, under an integrated aquaponic system with Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and crayfish (*Procambarus veracruzanus*). A completely randomized design with repeated measures was used, evaluating two plant species ($n = 6$) over 15-day periods. The data were subjected to analysis of variance, Tukey tests; $P < 0.05$, and principal components analysis (PCA). *S. edule* presented a stem length and thickness of 210 cm and 0.3 cm, respectively, while *A. hybridus* presented 63.15 cm and 0.71 cm for these variables, with significant differences ($P < 0.05$). The PCA indicated that nitrates and pH influence plant growth assessment. Growth rates of *S. edule* ($R^2 = 87\%$) and *A. hybridus* ($R^2 = 93\%$) followed logarithmic curves. The evaluated species completed their development in the established aquaponic system, making it a viable alternative for promoting their cultivation and local use.

Keywords: Aquaculture; nutrient cycling; analysis of variance; multivariate analysis.

RESUMEN

Una alternativa sostenible para el aprovechamiento de recursos biológicos con potencial de uso local, es mediante la producción multitrófica. Se evaluó el crecimiento de *Sechium edule* var. *virens levis* y *Amaranthus hybridus* y su correlación con parámetros fisicoquímicos del agua bajo un sistema acuapónico integrado con tilapia (*Oreochromis niloticus*) y camarón burrito (*Procambarus veracruzanus*). Se utilizó un diseño completamente al azar con medidas repetidas, evaluando dos especies vegetales ($n = 6$) en periodos de tiempo de 15 días. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y pruebas Tukey; análisis de correlación y componentes principales (ACP). *S. edule* presentó una longitud y grosor de

tallo de: 210 cm y 0.3 cm respectivamente, mientras que *A. hybridus* presentó 63.15 cm y 0.71 cm para dichas variables, con diferencias significativas ($P < 0.05$). El ACP indicó que nitratos y pH influyen la correlación del crecimiento de las plantas. Las tasas de crecimiento de *S. edule* ($R^2 = 87\%$) y *A. hybridus* ($R^2 = 93\%$) se ajustaron a curvas logarítmicas. Las especies evaluadas completaron su desarrollo en el sistema acuapónico establecido, por lo que resulta una alternativa viable para promover su cultivo y aprovechamiento local.

Palabras clave: Acuicultura; ciclado de nutrientes; análisis de varianza; análisis multivariado.

INTRODUCCIÓN

Ante los impactos negativos que suelen asociarse a la producción intensiva de peces y hortalizas, la implementación de sistemas multitróficos como la acuaponía ha sido considerada como una alternativa prometedora para la producción de alimentos (Maucieri *et al.*, 2018). Si bien, la horticultura y acuicultura son sistemas de producción con grandes avances tecnológicos asociados a maximizar su productividad, existen implicaciones ecológicas que limitan su sostenibilidad. Por un lado, se observan problemáticas asociadas a las descargas de excretas y alimento como residuos piscícolas y por otro, la dependencia de productos agroquímicos para el desarrollo vegetativo impactando en los recursos hídricos, edáficos y la biodiversidad (FAO, 2020). Sin embargo, al integrar técnicas de cultivo como la hidroponía y la acuicultura recirculante en un mismo sistema, los elementos que lo conforman devuelven un proceso simbiótico e integral perfilándose como un método sostenible de producción de alimentos (Akaeze y Nandwani, 2020).

La acuaponía como tecnología amigable con el ambiente y diseñada bajo un enfoque sustentable, es un sistema que combina la producción agrícola y acuícola, en un sistema de recirculación cerrada, donde se aprovechan los desechos de los animales acuáticos para nutrir a las plantas sembradas en

*Autor para correspondencia: Miguel Cebada Merino

Correo-e: mcebada@uv.mx

Recibido: 4 de octubre de 2024

Aceptado: 1 de octubre de 2025

Publicado: 20 de enero de 2026

camas de cultivo (König *et al.*, 2018). El objetivo de la acuaponía radica en obtener una producción de plantas y peces (y crustáceos y moluscos) de manera multitrófica y orgánica, en un sistema que no contamina al ambiente, promueve el cuidado del recurso hídrico, es una alternativa de producción de alimentos y contribuye a garantizar la seguridad alimentaria a nivel familiar, puesto que está alineado con los Objetivos del Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (Colorado y Ospina, 2019). La acuaponía no emplea fertilizantes químicos ni agroquímicos, además, se utiliza sólo un 10 % de agua, comparado con la agricultura, que emplea el 70 % (Ramírez y Sabogal, 2008) o el 100 % en cultivos hidropónicos (König *et al.*, 2018).

El chayote verde liso (*Sechium edule* (Jacq) Sw. var. *virens levis*) es una hortaliza con importancia alimentaria y comercial en México, actualmente se exporta a otros países; su principal zona de producción corresponde a la región de Las Montañas, en el centro de Veracruz, México, donde genera una importante fuente de empleos por la siembra y manejo del cultivo, generando un impacto significativo comercial a nivel local, regional, nacional e internacional (Castillo-Martínez y Romero-Jaen, 2024). Sin embargo, la limitada disponibilidad de los recursos: suelo y agua, así como los efectos de los sistemas biológicos y climáticos han contribuido, entre otras cosas, en el uso desmedido y dependiente de insumos agroquímicos (tóxicos) para el mantenimiento de la producción con efectos ecológicos adversos incluyendo la inocuidad e inseguridad alimentaria del consumidor; Por ejemplo, el quelite blanco silvestre (*Amaranthus hybridus* L.), una planta considerada como “maleza”, debido a que causa competencia de recursos edáficos con los cultivos, es erradicada con herbicidas y productos agrotóxicos, amenazando su diversidad genética y aumentando el riesgo de toxicidad cruzada a animales y humanos (Manzanero-Medina *et al.*, 2020); sin embargo, es una planta con importancia alimentaria debido a su contenido de aminoácidos esenciales, carbohidratos y elementos minerales con beneficios a la salud (Balcázar-Quñones *et al.*, 2020; Ortega-García *et al.*, 2025).

En este contexto, la acuaponía puede incrementar la producción de organismos de interés alimenticio como el chayote verde liso y el quelite blanco silvestre, pero es im-

portante evaluar su crecimiento y desarrollo bajo un sistema acuapónico para transferir la tecnología a los productores interesados y establecer módulos en sus localidades (Junge *et al.*, 2020). Dado que no hay estudios sobre la implementación del chayote verde liso (*S. edule*) y quelite blanco silvestre (*A. hybridus*) en un sistema de acuaponía, el objetivo del estudio fue evaluar el crecimiento y desarrollo de *S. edule* y *A. hybridus* en un sistema acuapónico integrado con tilapia (*Oreochromis niloticus*) y acocil (*Procambarus veracruzans*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño, construcción y aclimatización del sistema acuapónico

Se construyó un sistema acuapónico basado en camas de sustrato (media bed) en un bidón de 1000 L. Este se cortó a una capacidad de 700 L, la parte cortada del bidón (300 L) fue llenada con tezontle rojo (granulometría de 3-5 cm) y colocada en la parte de superior, fungiendo como cama para el cultivo de las plantas de chayote y quelite. Para el bombeo del agua del bidón a la cama de cultivo, se utilizó una bomba sumergible con un caudal de 1500 L/h y altura máxima de 2.5 m (modelo: 4215, marca: Aquasub). Para regular el nivel de agua en la cama de cultivo, se instaló un sifón tipo campana (Figura 1).

La aclimatización del sistema consistió en el proceso de equilibrar la cantidad cloro (Cl^-) y nitratos (NO_3^-) del agua, ya que ambos contenedores se llenaron con agua potable. Este proceso tardó 4 semanas para hacer proliferar a las colonias de bacterianas nitrificantes encargadas de convertir el amonio a nitratos, lo que se logró a partir de agregar alimento para peces como fuente de amonio (Goddek *et al.*, 2019). Se tomaron lecturas de los niveles de Cl^- con un kit colorimétrico Pool Style hasta obtener entre 0.2 y 0.5 ppm, ya que se considera viable para acuaponía. Los niveles de pH, amonio, nitritos y nitratos fueron evaluados mediante el uso del kit colorimétrico API Water Test Kit Freshwater®. Cuando fue necesario, el agua se tituló con cromato de potasio (K_2CrO_4) y nitrato de plata (AgNO_3), hasta observar valores equilibrados y menores a 10 ppm de amonio, nitritos y nitratos y un pH alrededor de 7 (Tabla 1).

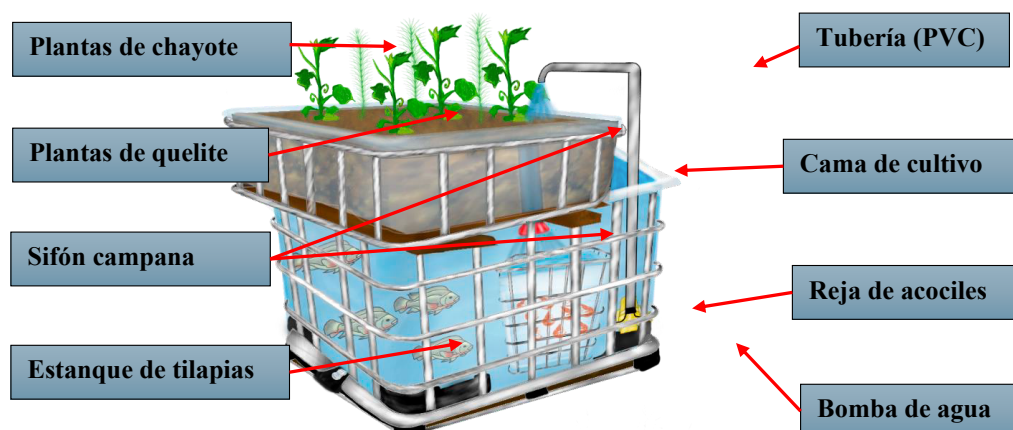


Figura 1. Diseño del sistema acuapónico para evaluar el crecimiento de chayote y quelite.
Figure 1. Aquaponic system design to evaluate the growth of chayote and quelite.

Tabla 1. Parámetros químicos evaluados durante el proceso de maduración del sistema acuapónico.**Table 1.** Chemical parameters were evaluated during the maturation process of the aquaponic system.

Semana de evaluación	pH	Amonio (mg L ⁻¹)	Nitritos (mg L ⁻¹)	Nitratos (mg L ⁻¹)
1	7.4	0.5	0.25	5
2	7.2	0.25	1	5
3	7	0.5	2	5
4	7.2	0.25	0.5	10

Después de la aclimatización, la columna de agua del sistema acuapónico estuvo ocupada por 30 ejemplares de alevines de mojarra tilapa (*Oreochromis niloticus*) de la progenie de súpermacho, los cuales presentaron un tamaño aproximado de 3.5 cm de longitud y un peso de 1.5 g al inicio del experimento. También incluyó a 10 ejemplares de acociles o camarones de río (*Procambarus veracruzanus*), que se colectaron de arroyos y riachuelos del municipio de Córdoba, Veracruz; el tamaño de los acociles varió entre los 4 a 6 cm de longitud.

Evaluación de parámetros fisicoquímicos

Después de haber aclimatado el sistema acuapónico, se tomaron lecturas de siete parámetros fisicoquímicos cada 15 d durante un periodo de cinco meses, con dos réplicas de lectura durante el periodo de diciembre de 2023 a abril de 2024. En total, se tomaron 43 lecturas de la temperatura (°C) y pH medidos con un detector electrónico marca LAQUAtwin®; amonio (NH₄⁺; mg L⁻¹), nitritos (NO₂⁻; mg L⁻¹), nitratos (NO₃⁻; mg L⁻¹), calcio (Ca⁺⁺; mg L⁻¹) y oxígeno disuelto (OD; mg L⁻¹) se obtuvieron mediante un kit comercial de colorimetría API Water Test Kit Freshwater®.

Manejo y evaluación de las especies hortícolas

El presente experimento inició en diciembre de 2023 y finalizó en mayo de 2024. El tamaño de muestra evaluado en el estudio fueron n = seis plantas de *S. edule* y n = seis plantas de *A. hybridus*, teniendo un n = 12 plantas, sanas, con madurez fisiológica adecuada y sin daños físicos. Tanto las semillas de *S. edule* y *A. hybridus* quelite fueron recolectadas de huertas ubicadas en la comunidad de Campo Grande, municipio de Ixtaczoquitlán, Veracruz. Los frutos y semillas de *S. edule* y *A. hybridus* fueron sembrados en bolsas de invernadero y en charolas para germinación en un sustrato con 50 % tierra negra y 50 % hojarasca; se dejaron germinar, crecer y desarrollarse durante 15 d y fueron trasplantadas a la cama de cultivo del sistema acuapónico. Cada 15 d se realizaron registros de biometrías para las plantas de *S. edule*: longitud y diámetro de tallo, así como del fruto (cm) y número de hojas. Para las plantas de *A. hybridus*, se registró longitud y diámetro de tallo, así como de las hojas y el número de estas. Cada mes, se realizaron observaciones en tallos, hojas y raíces para identificar síntomas de infestación o enfermedad, registrando la fecha y características de la plaga o enfermedad, mismas que fueron cotejadas con la literatura.

Se estimaron las tasas de crecimiento para las plantas de *S. edule* y de *A. hybridus* con la siguiente fórmula: $TC = Lf - Li / N^\circ$ de meses evaluados, donde: TC = Tasa de crecimiento, Li = Longitud inicial, Lf = Longitud final (Blair y Taylor, 2008). Las TC se evaluaron mediante curvas logarítmicas y el ajuste del coeficiente de determinación (R^2), también se estimó la ecuación de regresión tanto para el *S. edule* como el quelite. Se estimó el porcentaje (%) de sobrevivencia (porcentaje de plantas que sobrevivieron en el experimento) con la siguiente fórmula: $TS = Ovf \times 100 / Ovi$, dónde: TS = Tasa de sobrevivencia, Ovi = Organismos vivos inicialmente, Ovf = Organismos vivos finalmente. Se registraron datos de la fecha a la primera floración y fructificación.

Análisis estadístico

El diseño experimental utilizado en el estudio fue un diseño completamente al azar con medidas repetidas, cada especie conformó un tratamiento con seis repeticiones por especie, a las cuales se evaluó la longitud y diámetro durante 4 muestreos quincenales. Los datos obtenidos de las variables relacionadas con el crecimiento de las especies vegetales, se procesaron para evaluar los supuestos de normalidad de Shapiro-Wilks y de homogeneidad de varianzas de Levene's, se estimaron los estadísticos de tendencia central, se aplicaron análisis de varianza y pruebas *post-hoc* de Tukey con el objetivo de determinar diferencias significativas entre las fechas de evaluación de las biometrías (Blair y Taylor, 2008).

Para evaluar la correlación de los parámetros fisicoquímicos con el crecimiento y desarrollo de las plantas de chayote y quelite, se llevó a cabo un análisis de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), este integra un Análisis de Componentes Principales (ACP) y un análisis de Regresión Lineal, con el objetivo de analizar la correlación entre variables predictoras con las variables dependientes. En este caso, las variables predictoras fueron las biometrías (longitud y ancho de tallo y número de hojas), las variables independientes incluyeron los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, amonio, nitritos, nitratos, oxígeno disuelto y calcio), y como criterios de clasificación, fueron los periodos de estudio (meses) y las especies hortícolas (Balzarini *et al.*, 2008). Se representó en un diagrama "tri-plot" donde se observa la correlación que tienen las variables dependientes sobre las variables predictoras. El PLS se ha implementado en estudios para la caracterización, la correlación de las poblaciones biológicas con los agroecosistemas, en estudios de diversidad genética y su interacción con diferentes ecosistemas (Serna-Lagunes *et al.*, 2023) y para correlacionar variables morfo agronómicas con respecto a características edafoclimáticas (Hernández-Salinas *et al.*, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros fisicoquímicos del agua

En los sistemas acuapónicos, es necesario mantener un equilibrio en los parámetros para el óptimo desarrollo de las especies (Goddek *et al.*, 2019). En las condiciones del presente estudio, considerado como un sistema acoplado,

las condiciones del sustrato para el desarrollo de especies vegetales son similares a las del estanque acuícola por lo que el control de parámetros se torna complejo a diferencia de los sistemas desacoplados (Patloková y Pokluda, 2024). En el presente estudio, la temperatura promedio del agua durante el periodo de evaluación fue de 23.4 ± 2.74 °C lo que facilita el desarrollo radicular de las especies vegetales al favorecer la dinámica de absorción de nutrientes y disponibilidad de oxígeno, tanto para las especies acuícolas y microorganismos (Thakulla *et al.*, 2021). Krastanova *et al.* (2022) han reportado una temperatura óptima entre 22 y 24 °C. Por otro lado, Vasdravanidis *et al.* (2022), mencionan que temperaturas entre 7 y 18 °C provocan una reducción de apetito y actividad metabólica de especies acuícolas.

En este estudio, los parámetros químicos monitoreados en el agua no fueron constantes, por lo que presentaron un efecto variable e inestable con un impacto en el desarrollo y crecimiento de las especies hortícolas. En las plantas de *S. edule* durante los meses de marzo-abril, amonio, nitritos, nitratos y calcio dejaron de tener efecto en su desarrollo vegetativo, esto en comparación con el estudio de Estrada-Pérez *et al.* (2018), que al reportar valores de pH cercanos a 7, obtuvo desarrollo óptimo del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) y pepino (*Cucumis sativus*), registrando una longitud final de hojas de lechuga que variaron de 13.53 a 28.5 cm, una longitud final de la planta de pepino que varió de 119 a 235.3 cm y la biomasa de pepino varió de 0.98 a 0.99 kg m⁻²; sin embargo, el incremento en longitud y ancho de tallo, presencia de hojas se debe a la etapa de floración de *A. hybridus*. Babatunde *et al.* (2019) mencionan que, las plantas de *A. hybridus* se adaptan a los sistemas de acuaponía, reportando una tasa de crecimiento significativamente mayor con el aumento de la densidad de peces.

En cuanto al pH del agua, se registró un valor promedio de 7.57 ± 0.09 , condición que se considera por encima del rango sugerido: 5.5 a 6.5 para una adecuada absorción de nutrientes por las raíces de las plantas (Gillespie *et al.*, 2020). Villalobos-Reyes *et al.* (2016) mencionan que, un pH alcalino limita la disponibilidad y absorción de nutrientes como el K y Fe aunado a que son elementos que se encuentran en concentraciones bajas en sistemas acuapónicos (Chen *et al.*, 2023); pueden ser desplazados por elementos como el Al y Mg. El pH es un parámetro importante en la productividad, calidad de alimentos, resiliencia del sistema acuapónico, por lo que es recomendable mantener un pH de 6 unidades en los sistemas de acuaponía.

Por otro lado, el amonio no rebasó la concentración de 1 ppm, encontrándose entre 0.25 y 1 ppm. La concentración de nitritos promedio fue de 0.38 ± 0.52 ppm, con un coeficiente de variación (CV) que superó el 100 %, lo que implica que hubo variaciones extremas en la concentración de nitritos. Los nitratos registraron una concentración de 31.51 ± 23.92 ppm en promedio, y también sus valores variaron en un 76%. La concentración de calcio se registró en 622.72 ± 608.94 ppm en promedio, mientras que la concentración de oxígeno disuelto se registró en 4.94 ± 1.51 mg L⁻¹, con un CV

menor a 30, lo que indica una estabilidad (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de tendencia central de los parámetros fisicoquímicos del agua del sistema acuapónico con chayote y quelite.

Table 2. Central tendency values of the physicochemical parameters of the water in the aquaponic system with chayote and quelite.

Parámetros fisicoquímicos	Media	DE	EE	CV	Mínimo	Máximo
Temperatura	23.39	2.74	0.42	11.69	18.5	29.1
pH	7.57	0.09	0.01	1.14	7.2	7.6
Amonio (ppm)	0.36	0.23	0.03	62.95	0.25	1
Nitritos (ppm)	0.38	0.52	0.08	137.23	0	2
Nitratos (ppm)	31.51	23.92	3.65	75.9	5	80
Calcio (ppm)	622.72	608.94	92.86	97.79	16	2500
Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	4.94	1.51	0.23	30.6	2.2	10

DE = Desviación estándar, EE = error estándar, CV = coeficiente de variación, ppm = partes por millón.

DE = Standard deviation, EE = standard error, CV = coefficient of variation, ppm = parts per million.

Biometría de especies vegetales

Se encontraron diferencias ($p < 0.05$) entre el crecimiento de las plantas de *S. edule* esto derivado de que, en el mes de abril, los tallos alcanzaron una longitud de 210 cm (Tabla 3). En cuanto al diámetro de tallo, las diferencias ($p < 0.05$) se observaron de diciembre-abril. Se presentaron diferencias ($p < 0.05$) en cuanto al número de hojas, siendo los meses de diciembre-febrero con mayor cantidad de hojas, y a partir de marzo-abril, la cantidad de hojas disminuyó (Figura 2).

Tabla 3. Cuadrados medios y significancia estadística para tres variables morfológicas en plantas de *S. edule* establecidas en sistema acuapónico.

Table 3. Mean squares and statistical significance for three morphological variables in *S. edule* plants established in an aquaponic system.

Fuente de variación	G. L.	L. Tallo	D. Tallo	n Hojas
Tratamiento	4	19606.3364 **	0.3857 **	459.5248 **
Error	37	1205.3044	0.0014	69.6704
Total	41			
C.V. (%)		27.9	11.6	44

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; ns = no significativo; G.L = grados de libertad; L.Tallo = Longitud de tallo (cm); D. Tallo = diámetro de tallo (cm); n hojas = número de hojas; C.V. (%) = coeficiente de variación.

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; ns = not significant; G.L = degrees of freedom; L. Tallo = Stem length (cm); D. Tallo = Stem diameter (cm); N hojas = number of leaves; C.V (%) = coefficient of variation.

El desarrollo vegetativo de la longitud de tallo de *A. hybridus* fue significativamente menor ($P < 0.05$) en los meses de febrero a mayo, siendo el periodo de marzo a mayo donde la longitud del tallo alcanzó los 63.15 cm (Tabla 4). En cuanto al ancho de tallo, a partir del mes de marzo, se presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$) debido al incremento de 0.71 cm promedio en el diámetro del tallo (Figura 3). El número de hojas en las plantas de *A. hybridus* presentó dife-

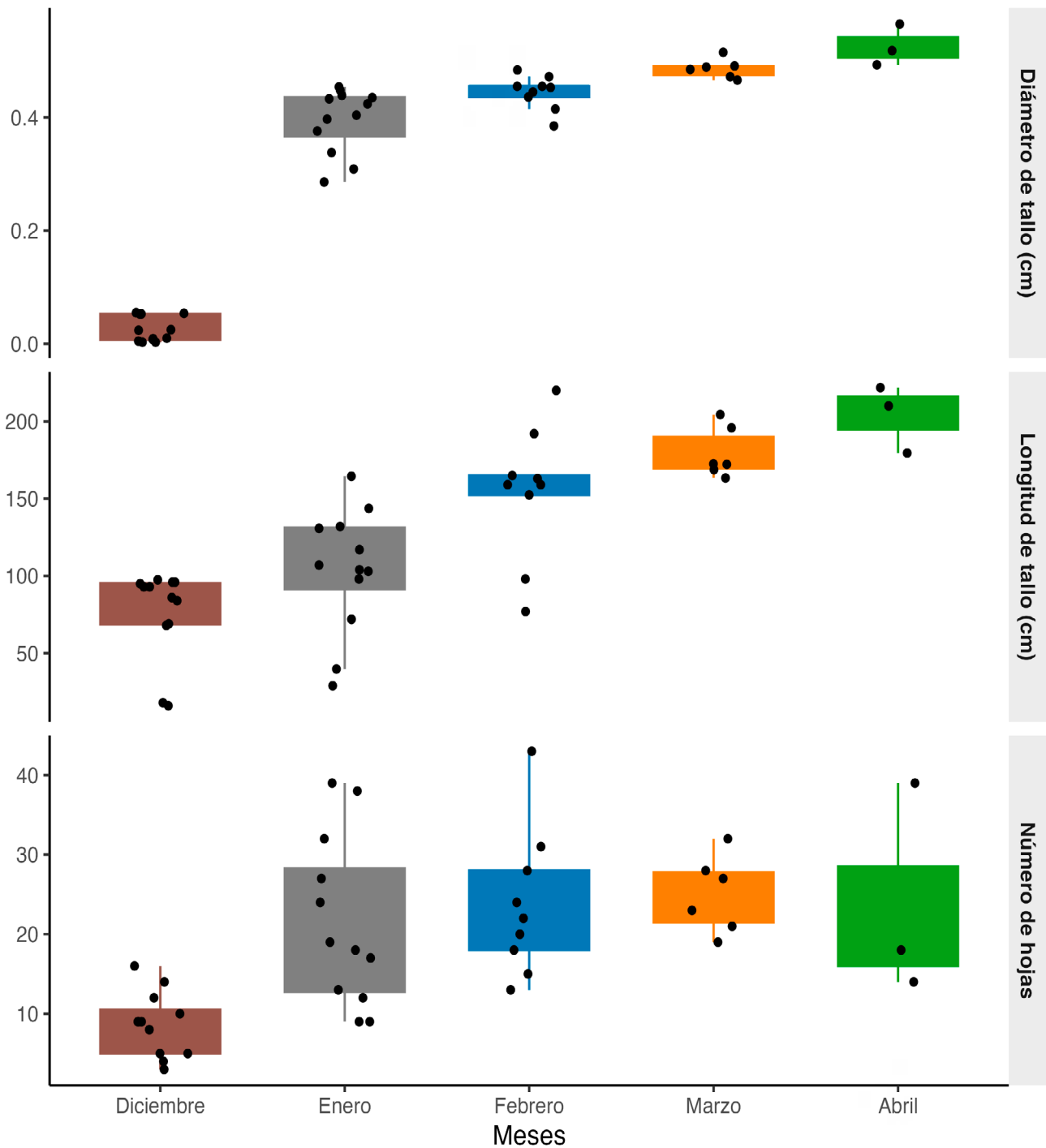


Figura 2. Análisis de varianza para la longitud de tallo (a), ancho de tallo (b) y número de hojas (c) de *S. edule* en un sistema acuapónico.
Figure 2. Analysis of variance for length (top), width (middle) and number of leaves (bottom) of *S. edule* in an aquaponic system.

rencias significativas ($P < 0.05$), ya que durante los meses de febrero-mayo existió un incremento notorio en el aumento del follaje con 54 hojas por planta en promedio (Figura 3).

El análisis de correlación por mínimos cuadrados parciales (PLS) explicó el 92.5% de la correlación entre los parámetros fisicoquímicos del agua del sistema acuapónico y el crecimiento de chayote, indicando que la longitud y diámetro de tallo, así como el número de hojas estuvo asociado a cambios en el pH y a variaciones en la concentración de

calcio en los meses de diciembre, enero y febrero (Figura 4). Por otro lado, el desarrollo de las plantas de quelite, durante los meses de marzo, abril y mayo, se relacionó de manera significativa con un incremento en la longitud y diámetro del tallo, así como el número de hojas. Especialmente, la temperatura, pH, calcio y amonio influyeron en un incremento de las biometrías de las plantas durante marzo-mayo (Figura 4).

La tasa de crecimiento de las plantas de *S. edule* presentaron un crecimiento asintótico, lo que denota un

Tabla 4. Cuadrados medios y significancia estadística para tres variables morfológicas en plantas de *A. hybridus* establecidas en sistema acuapónico.**Table 4.** Mean squares and statistical significance for three morphological variables in *A. hybridus* plants established in an aquaponic system.

Fuente de variación	G.L.	L. Tallo	D. Tallo	n Hojas
Tratamiento	3	8798.729**	0.982**	5182.5417**
Error	52	44.6409	0.0167	83.0618
Total	55			
C.V. (%)		21.8	31.1	31.4

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; ns = no significativo; G.L. = grados de libertad; L. Tallo = Longitud de tallo (cm); D. Tallo = diámetro de tallo (cm); n hojas = número de hojas; C.V. (%) = coeficiente de variación.

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; ns = not significant; G.L. = degrees of freedom; L. Tallo = Stem length (cm); D. Tallo = Stem diameter (cm); n hojas = number of leaves; C.V. (%) = coefficient of variation.

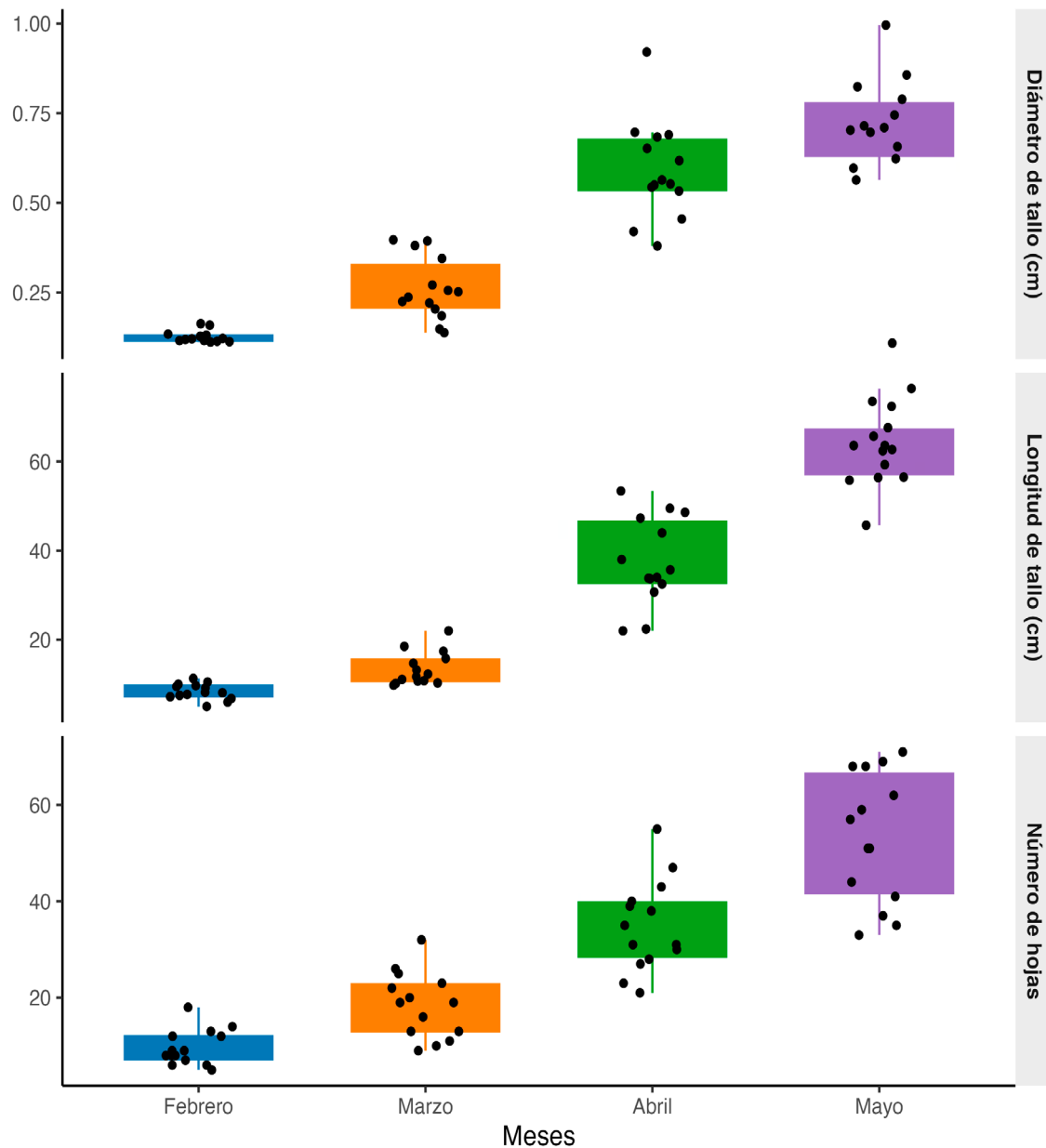
**Figura 3.** Análisis de varianza y gráfico de cajas y bigotes de la longitud (arriba), ancho (en medio) y número de hojas (abajo) de *A. hybridus* en un sistema acuapónico.

Figure 3. Analysis of variance and box-and-whisker plot of *A. hybridus* leaf length (top), width (middle), and number of leaves (bottom) in an aquaponic system.

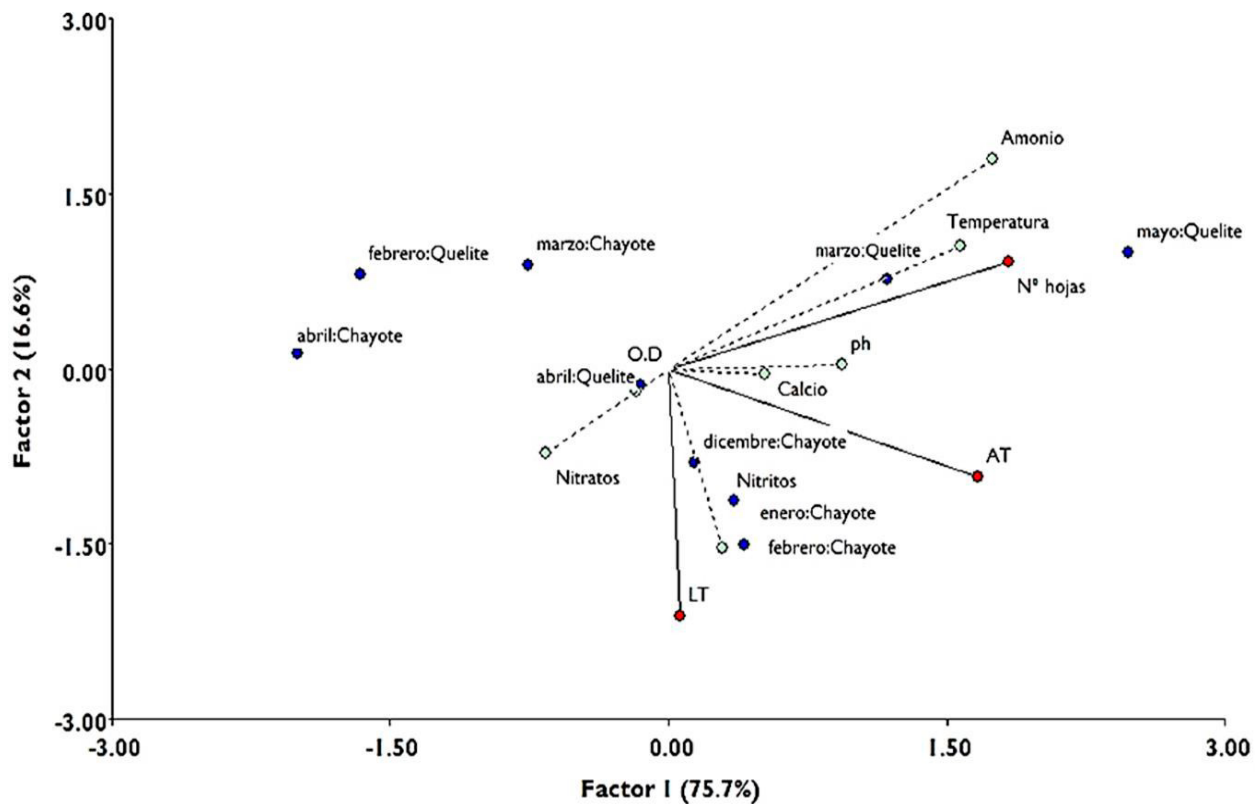


Figura 4. Análisis de mínimos cuadrados parciales (PLS) de la correlación entre una matriz de interacción entre dos especies hortícolas (chayote y quelite) y tres variables de crecimiento y desarrollo (LT, longitud del tallo; AT, ancho de tallo; N, número de hojas), contra la matriz de siete parámetros fisicoquímicos del agua del sistema acuapónico.

Figure 4. Partial least squares (PLS) analysis of the correlation between an interaction matrix between two horticultural species (chayote and quelite) and three growth and development variables (LT, stem length; AT, stem width; N, number of leaves), against the matrix of seven physicochemical parameters of the water of the aquaponic system.

crecimiento continuo al aumentar la masa vegetal y biomasa de las plantas; al final de la curva, se presenta una tendencia logarítmica, que se relaciona con un crecimiento que disminuye con base en la edad de la planta; consistente con el coeficiente de determinación de R^2 , que indica un 87 % de correlación en las tasas de crecimiento con respecto a una curva asintótica-logarítmica (Figura 5). Por su parte, las tasas de crecimiento de *A. hybridus* presentaron una curva de tendencia logarítmica, lo que indica crecimiento vegetativo

exponencial en cortos periodos de tiempo; esto implica un coeficiente de determinación mayor al 93 %, indicando una alta tasa de crecimiento asociada a una tendencia exponencial de crecimiento (Figura 5).

S. edule al ser una hortaliza de fruto presenta mayor demanda de nutrientes para alcanzar su fructificación, requiere mayor concentración de P, K y Ca, como ocurre en tomate (*Solanum lycopersicum*), donde el crecimiento de las plantas de tomate en acuaponía mostró un aumento de longitud

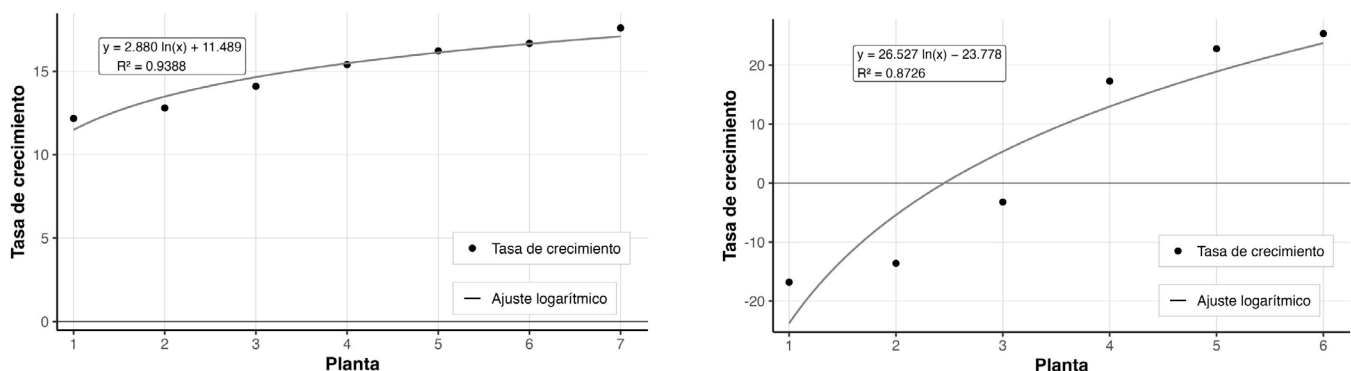


Figura 5. Tasas y curvas de evaluación del crecimiento de plantas de chayote (arriba) y de quelite (abajo) en un sistema acuapónico.

Figure 5. Growth rates and evaluation curves of chayote (top) and quelite (bottom) plants in an aquaponic system.

de tallo, pero en ancho de tallo no hubo un incremento, y en número de hojas el promedio fue de 33 hojas por planta; pero en frutos, la cantidad va de 4 a 6 frutos (Sandoval-Villa *et al.*, 2016), una cantidad similar con lo reportado en este trabajo. El tamaño alcanzado en los chayotes está ligado a la deficiencia nutrimental y a problemas de pH. De acuerdo con Meena *et al.* (2023), esto limita la disolución de nutrientes como Fe, Mg, Ca, P y K, aunado a la dificultad de la planta para adquirir estos nutrientes, y, por ende, esto implica la deficiencia en la capacidad de desarrollo de frutos. Piñero *et al.* (2020) mencionan que las raíces de las plantas de chayote en un sistema acuapónico tienen la capacidad de mejorar su desarrollo vegetativo, ya que bacterias nitrificantes tienen la capacidad de proteger a la raíz utilizando una capa protectora compuesta de sustancias exopoliméricas, y pueden competir con sustancias de bacterias patógenas.

Los niveles de calcio fueron insuficientes para los requerimientos de desarrollo de frutos de *S. edule*, pero fueron favorables para el crecimiento y desarrollo vegetal de ambas especies hortícolas. La concentración de oxígeno disuelto se

mantuvo en los parámetros aceptables para la proliferación bacteriana, esto permitió el equilibrio en el crecimiento y desarrollo de las plantas, pues de acuerdo con Somerville (2014), valores constantes menores a 3 mg L⁻¹ de oxígeno disuelto causan una disminución en la capacidad de absorber nutrimentos por las raíces. El sistema de aireación por el flujo continuo de agua y el sistema de sifoneo permitieron el flujo constante del oxígeno disuelto, además contribuyó a la eliminación de sedimentos en las raíces de las plantas. En la última semana de marzo se registró la floración de *S. edule*, posteriormente en la tercera semana de abril, se reporta la fructificación, sin embargo, cuatro frutos no obtuvieron un buen crecimiento y desarrollo, registrando un tamaño de 4 cm, mientras que un solo fruto alcanzó un tamaño de 10 cm, que se considera la talla comercial (Figura 6).

Identificación de plagas y enfermedades

Los factores ambientales como clima, temperatura, humedad, así como densidad de cultivo de plantas y la concentración nutrimental en el flujo de agua, son parámetros que

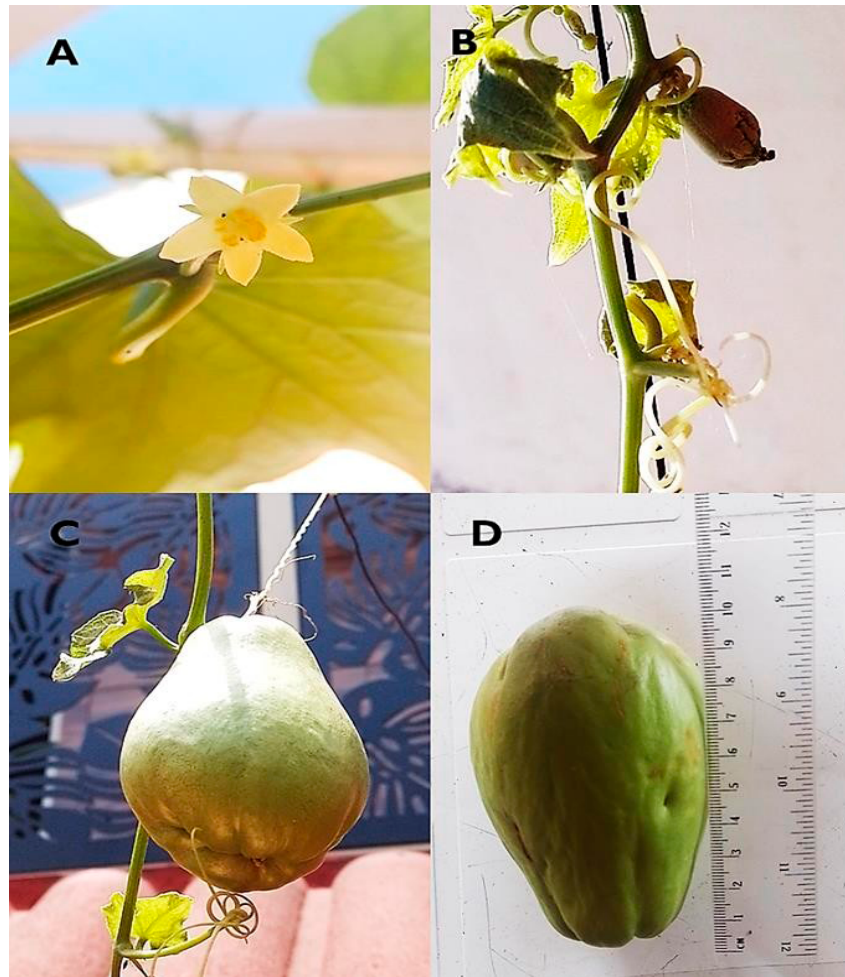


Figura 6. Floración y fructificación de plantas de *S. edule* en un sistema acuapónico; A) flores desarrolladas, B) frutos de tamaño de 4 cm, C) fruto desarrollado, D) morfología del fruto, alcanzando 10 cm.

Figure 6. Flowering and fruiting of *S. edule* plants in an aquaponic system; A) developed flowers, B) 4 cm sized fruits, C) developed fruit, D) fruit morphology, reaching 10 cm.

propician la infestación de plagas y enfermedades en los cultivos (Suárez-Cáceres *et al.*, 2021b). La incidencia de plagas y enfermedades en plantas bajo sistemas de acuaponía es más difícil de controlar, debido a que no se puede agregar algún producto agroquímico, ya que el flujo de agua está siendo usado por las especies acuícolas. De acuerdo con Suárez-Cáceres *et al.* (2021c) reportaron plagas como mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) y araña roja (*Tetranychus urticae*) y hongos como *Fusarium* y *Pythium* en tomate y fresa, sin embargo, al tener un sistema desacoplado, es decir, la cama de cultivo estaba separada del estanque de peces, se pudo agregar una concentración mínima de fungicida de manera foliar. Sin embargo, en este estudio los daños causados por plagas como pulgón áptero (*Rhopalosiphum maidis*), chinche (*Deraeocoris lutescens*), araña roja (*Tetranychus urticae*) fueron especialmente en hojas de las plantas de *S. edule*, lo que redujo el número de estas en cada planta, así mismo la presencia de hongo como la cenicienta causó problemas en tejidos foliares. La presencia de plagas y enfermedades en las plantas implica la reducción de capacidad de absorción de nutrientes, por lo que las plantas se vuelven más vulnerables y disminuye la capacidad de crecimiento y desarrollo vegetativo (Rivas-García *et al.*, 2020). Dentro de los sistemas hidropónicos y acuapónicos, las plantas son más susceptibles a hongos como *Pythium spp.* y *Phytophthora spp.* Asimismo, los oomicetos son patógenos que presentan una estructura llamada zoospora, que se adapta al medio acuoso, y mediante esta vía infecta a las raíces de las plantas (Folorunso *et al.*, 2021).

En marzo hubo presencia de plagas y enfermedades en las plantas del sistema acuapónico, las cuales afectaron la sobrevivencia de las plantas. Al respecto, el porcentaje de tasa de sobrevivencia fue de un 50 % para chayote y, el porcentaje en *A. hybridus* fue del 100 %. La presencia de plagas se encontró solo en las plantas de *S. edule*, específicamente en hojas fue donde predominó su actividad, causando deterioros como corte foliar dentro del haz y envés, dejando algunas manchas necróticas. Las plagas que se registraron fueron pulgón áptero (*Rhopalosiphum maidis*), chinche (*Deraeocoris lutescens*), araña roja (*Tetranychus urticae*) y Catarina (Figura 6). La presencia de enfermedades se presentó en *S. edule*, específicamente en hojas, en toda la parte foliar de las plantas se presentó clorosis en el haz y en el margen de las hojas, también se identificó presencia de manchas blancas, marrones (antracnosis) y verde-amarillas, así como la presencia de hongos como cenicientas polvorientas (Figura 7).

De acuerdo con Knoll y Marry (2022), en sistemas acuapónicos algunas enfermedades aún no han sido descritas o halladas y se desconoce el agente causal, además existe la posibilidad que se dé una contaminación cruzada, ya que algún patógeno que cause enfermedades a plantas, pueda desencadenar anomalías en los organismos acuícolas o viceversa, como el caso de *Gilbertella persicaria*, un fitopatógeno que causa daños al camarón tigre negro, o transmiten enfermedades entre especies hortícolas, como la propagación de *Colletotrichum* de la berenjena a tomate, que



Figura 7. Presencia de plagas (arriba) en hojas de *S. edule*: A) chinche (*Deraeocoris lutescens*), B) Catarina, C) pulgón áptero (*Rhopalosiphum maidis*), D) araña roja (*Tetranychus urticae*) y (abajo) enfermedades en hojas de *S. edule*, A) hongos (manchas blancas) y clorosis (manchas amarillas), B) clorosis en haz y margen de la hoja, manchas marrones (antracnosis), C) cenicienta, D) clorosis en haz y envés de la hoja, antracnosis en haz y margen de la hoja.

Figure 7. Presence of pests (top) on *S. edule* leaves: A) chinch bug (*Deraeocoris lutescens*), B) ladybug, C) wingless aphid (*Rhopalosiphum maidis*), D) red spider mite (*Tetranychus urticae*) and (bottom) diseases on *S. edule* leaves, A) fungi (white spots) and chlorosis (yellow spots), B) chlorosis on the upper side and margin of the leaf, brown spots (anthracnose), C) powdery mildew, D) chlorosis on the upper and lower side of the leaf, anthracnose on the upper and margin of the leaf.

además, se ha evidenciado su infestación hacia camarones (Rivas-García *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

En el presente experimento, las especies vegetales evaluadas: *S. edule* y *A. hybridus* lograron completar su desarrollo para el aprovechamiento de sus órganos comestibles. Sin embargo, la variable pH dificultó en gran proporción la disponibilidad de nutrimentos acorde a los requerimientos y la dinámica de absorción por las plantas; lo que influyó en el rendimiento

y calidad de los productos cosechados, así como en la severidad de daños causados por plagas y enfermedades. Las investigaciones futuras deberán considerar la alternancia de especies vegetales con menor demanda nutrimental o ciclos más cortos de cultivo para garantizar condiciones para su desarrollo óptimo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) actualmente Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México por la beca de estudios de Maestría en Horticultura Tropical.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés en la presente obra académica y de investigación.

REFERENCIAS

- Akaze, O. y Nandwani, D. 2020. Urban agriculture in Asia to meet the food production challenges of urbanization: A review. *Urban Agriculture y Regional Food Systems*. 5(1): 1-7. <https://doi.org/10.1002/uar2.20002>
- Arrazate, C.H.A. y Iñiguez, J.C. 2010. Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización. Grupo Interdisciplinario de Investigación en *Sechium edule* en México, A.C.
- Balcázar-Quinones, A., White-Olascoaga, L., Chávez-Mejía, C. y Zepeda-Gómez, C. 2020. Los quelites: Riqueza de especies y conocimiento tradicional en la comunidad otomí de San Pedro Arriba, Temoaya, Estado de México. *Polibotánica*. 49: 219-242. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.49.14>
- Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J.A. y Robledo, C.W. 2008. Software Infostat. Manual del Usuario, InfoStat. Argentina.
- Babatunde, T.A., Ibrahim, K., Abdulkarim, B., Wagini, N.H. y Usman, S.A. 2019. Co-production and biomass yield of *Amaranthus (Amaranthus hybridus)* and tilapia (*Oreochromis niloticus*) in gravel-based substrate filter aquaponic. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 8(1): 255-261. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00297-5>
- Blair, R.C. y Taylor, R.A. 2008. *Biostatistics for the health sciences* (1st ed). Pearson Education.
- Campos-Pulido, R., Alonso-López, A., Asiain-Hoyos, A., Reta-Mendiola, J.L. y Álvaro-De La Cruz, D.A. 2015. La acuaponía, diversificación productiva sustentable. *AgroProductividad*, 8(3), 66.
- Castillo-Martínez, S. y Romero-Jaen, M. 2024. Chayote: El tesoro verde de las altas montañas de Veracruz – raíces de tradición y sabor: El tesoro verde de Veracruz. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 11. <https://doi.org/10.60158/rma.v11i2.444>
- Chen, P., Kim, H.-J., Thatcher, L.R., Hamilton, J.M., Alva, M.L., Zhou, Z. y Brown, P.B. 2023. Maximizing nutrient recovery from aquaponics wastewater with autotrophic or heterotrophic management strategies. *Bioresource Technology Reports*. 21: 101360. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101360>
- Colorado G.A. y Ospina C.M. 2019. Acuaponía como herramienta de formación de paz. (SENA). Partner Mercadeo y Medios Gráficos S.A.S.
- FAO. 2020. Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe 2020. FAO, OPS, WFP and UNICEF. <https://doi.org/10.4060/cb2242es>
- Folorunso, E.A., Roy, K., Gebauer, R., Bohatá, A. y Mraz, J. 2021. Integrated pest and disease management in aquaponics: A metadata-based review. *Reviews in Aquaculture*. 13(2): 971-995. <https://doi.org/10.1111/raq.12508>
- Gillespie, D.P., Kubota, C. y Miller, S.A. 2020. Effects of low pH of hydroponic nutrient solution on plant growth, nutrient uptake, and root rot disease incidence of Basil (*Ocimum basilicum* L.). *HortScience*, 55(8), 1251-1258. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14986-20>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B. y Burnell, G.M. 2019. Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Hernández-Salinas, G., Toledano-Toledano, F., Pérez-García, M., Sánchez-Valera, O.V., Ramírez-Rivera, E. de J., Serna-Lagunes, R., Rocandio-Rodríguez, M., Purroy-Vásquez, R., Fernández-López, C.L., López- Morales, F. y Garduño-Espinosa, J. 2022. Morpho-agronomic evaluation of native maize races associated with Mexican tropical climate agroforestry systems. *PLOS ONE*. 17(6): 269896. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269896>
- Junge, R., Antenen, N., Villarroel, M., Griessler Bulc, T., Ovca, A., y Milliken, S. 2020. Acuaponía: Libro de Texto para la enseñanza superior. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3948824>
- Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D. y Orozova, P. 2022. Aquaponic systems: Biological and technological parameters. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 36(1), 305-316. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892>
- König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M. y Junge, R. 2018. Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *Journal of Cleaner Production*. 180: 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.037>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P. y Borin, M. 2018. Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1012. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Manzanero-Medina, G.I., Vásquez-Dávila, M.A., Lustre-Sánchez, H. y Pérez-Herrera, A. 2020. Ethnobotany of food plants (quelites) sold in two traditional markets of Oaxaca, Mexico. *South African Journal of Botany*. 130: 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.01.002>
- Morales de la Luz, G., Serna-Lagunes, R. y Cebada-Merino, M. 2023. La acuaponía y su implementación como un escenario de aprendizaje. *Bioagrobiencias*. 16(1): 1-10. <https://doi.org/10.56369/BAC.4814>
- Ortega-García, N., Pérez-Olvera, M. Antonia, Raya-Pérez, J.C. y Aguirre-Mancilla, C.L. 2025. Endogenous increase of proline in leaves of quelite (*Amaranthus hybridus* L.) through sun drying. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/hgkhcm76>
- Patloková, K. y Pokluda, R. 2024. Optimization of plant nutrition in aquaponics: The impact of *Trichoderma harzianum* and *Bacillus mojavensis* on lettuce and basil yield and mineral status. *Plants*, 13(2), 291. <https://doi.org/10.3390/plants13020291>

- Piñero, M.C., Otálora, G., Collado-González, J., López-Marín, J. y del Amor, F.M. 2020. Differential effects of aquaponic production system on melon (*Cucumis melo* L.) fruit quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68(24): 6511-6519. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01124>
- Rivas-García, T., González-Estrada, R.R., Chiquito-Contreras, R.G., Reyes-Pérez, J.J., González-Salas, U., Hernández-Montiel, L.G. y Murillo-Amador, B. 2020. Biocontrol of phytopathogens under aquaponics systems. *Water*. 12(7): 2061. <https://doi.org/10.3390/w12072061>
- Sandoval-Villa, M., Sánchez-Escudero, J., Reta-Mendiola, J., Reyes-Flores, M., Trejo-Téllez, L.I. y Rodríguez-Mendoza, N. 2016. Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 17: 3529-3542.
- Serna-Lagunes, R., Ramos-Quechulpa, L., Torres-Cantú, G.B., Gastelum-Mendoza, F.I. y Tarango-Arámbula, L.A. 2023. Índice de rastros y características de la vegetación del hábitat de venado temazate rojo (*Mazama temama* Kerr) en el Parque Nacional Cañón del Río Blanco. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 26(57): 9. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4666>
- Serna-Lagunes, R., Zúñiga-Vega, J.J., Díaz-Rivera, P., Clemente-Sánchez, F., Pérez-Vázquez, A. y Reta-Mendiola, J.L. 2010. Variabilidad morfológica y crecimiento corporal de cuatro poblaciones de *Crocodylus moreletii* en cautiverio. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 81(3): 713-719. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2010.003.643>
- Somerville, C. 2014. Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming (FAO).
- Suárez-Cáceres, G.P., Fernández-Cabanás, V.M., Lobillo-Eguíbar, J. y Pérez-Urrestarazu, L. 2021a. Consumers' knowledge, attitudes and willingness to pay for aquaponic products in Spain and Latin America. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 24: 100350.
- Suárez-Cáceres, G.P., Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cabanás, V.M., Quevedo-Ruiz, F.J. y Pérez-Urrestarazu, L. 2021b. Polyculture production of vegetables and red hybrid tilapia for self-consumption by means of micro-scale aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*. 95: 102181. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102181>
- Suárez-Cáceres, G.P., Pérez-Urrestarazu, L., Avilés, M., Borrero, C., Lobillo Eguíbar, J.R. y Fernández-Cabanás, V.M. 2021c. Susceptibility to water-borne plant diseases of hydroponic vs. Aquaponics systems. *Aquaculture*. 544: 737093. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737093>
- Thakulla, D., Dunn, B., Hu, B., Goad, C. y Maness, N. 2021. Nutrient solution temperature affects growth and °Brix parameters of seventeen lettuce cultivars grown in an NFT hydroponic system. *Horticulturae*, 7(9), 321. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090321>
- Vasdravanidis, C., Alvanou, M.V., Lattos, A., Papadopoulos, D.K., Chatzigeorgiou, I., Ravani, M., Liantas, G., Georgoulis, I., Feidantsis, K., Ntinis, G.K. y Giantsis, I.A. 2022. Aquaponics as a promising strategy to mitigate impacts of climate change on rainbow trout culture. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 12(19), 2523. <https://doi.org/10.3390/ani12192523>
- Villalobos-Reyes, S., González-Pérez, E., Villalobos-Reyes, S. y González-Pérez, E. 2016. Determinación de la relación pez planta en la producción de tomate (*Lycopersicum sculentum* L.) en sistema de acuaponia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(5): 983-992.