



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**RENDIMIENTO Y USO EFICIENTE DE AGUA DE *Portulaca oleracea* L. y *Suaeda edulis* Flores Oliv. & Noguez
CULTIVADAS EN AGUA RESIDUAL DE ACUICULTURA.**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Agricultura Sustentable)

P r e s e n t a

Viviana Axel Rodríguez Galicia

La Paz, Baja California Sur, marzo de 2023.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 10:00 horas del día 21 del mes de febrero de 2023, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"RENDIMIENTO Y USO EFICIENTE DE AGUA DE *Portulaca oleracea* L. y *Suaeda edulis* Flores Oliv. & Noguez CULTIVADAS EN AGUA RESIDUAL DE ACUICULTURA"

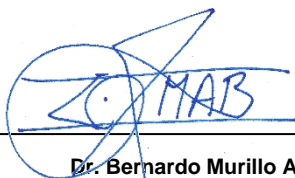
Presentada por la alumna:

Viviana Axel Rodríguez Galicia

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN AGRICULTURA SUSTENTABLE

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Bernardo Murillo Amador
Director de Tesis



Dr. Satoshi Yamada
Co-Tutor de Tesis



Dr. Enrique Troyo Diéguez
Co-Tutor de Tesis



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

La Paz, Baja California Sur, a 20 de febrero de 2023

Los miembros del comité de tesis de la estudiante VIVIANA AXEL RODRIGUEZ GALICIA del Programa de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el VoBo dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:
iThenticate
- Filtros utilizados:
Citas, Bibliografía
- Porcentajes de similitud:
18%
Se muestra captura de pantalla



Rank	Source	Similarity
1	Internet 488 palabras Copiado el 17-Oct-2022 diferencia-estructural.com	3%
2	Internet 452 palabras Copiado el 13-Ene-2023 diferencia-estructural.com	2%
3	Internet 128 palabras diferencia-estructural.com	1%
4	Internet 110 palabras Copiado el 19-Nov-2022 diferencia-estructural.com	1%
5	Internet 108 palabras Copiado el 17-Ene-2023 www.diferencia-estructural.com	1%
6	Internet 52 palabras Copiado el 21-Mar-2023 diferencia-estructural.com	<1%
7	Internet 75 palabras Copiado el 20-Nov-2022 diferencia-estructural.com	<1%
8	Internet 73 palabras Copiado el 20-Ene-2023 www.diferencia-estructural.com	<1%
9	Internet 69 palabras Copiado el 20-Oct-2022 diferencia-estructural.com	<1%
10	Internet 55 palabras Copiado el 17-Ene-2023 diferencia-estructural.com	<1%

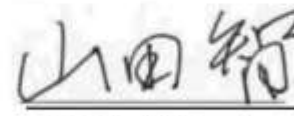
Firmas del comité



Dr. Bernardo Murillo Amador



Dr. Enrique Troyo Diéguez



Dr. Satoshi Yamada

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Bernardo Murillo Amador
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Director de Tesis

Dr. Enrique Troyo Diéguez
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
Co-Tutor de Tesis

Dr. Satoshi Yamada
Tottori University, Japan
Co-Tutor de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. Bernardo Murillo Amador
Dr. Enrique Troyo Diéguez
Dr. Satoshi Yamada

Jurado de Examen

Dr. Bernardo Murillo Amador
Dr. Enrique Troyo Diéguez
Dr. Satoshi Yamada

Suplentes

Dra. Alejandra Nieto Garibay

Resumen

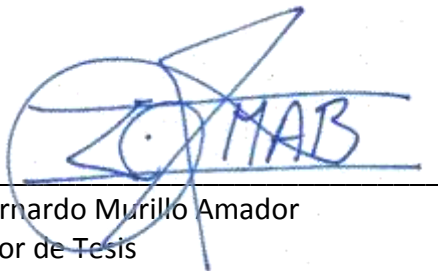
En las zonas áridas y semiáridas la escasez de agua limita la capacidad productiva. Ante esta problemática, el sector agrícola requiere reducir la cantidad de agua utilizada e incrementar la eficiencia en el uso del agua (EUA). Los efluentes acuícolas representan una fuente hídrica y de fertilizantes que puede ser utilizada para la producción hidropónica de hortalizas. La verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) y los romeritos (*Suaeda edulis* Flores Olv. & Noguez) forman parte de las tradiciones culinarias de México con factibilidad para ser cultivadas en sistemas hidropónicos, lo que permite incorporar aguas de calidad baja a los sistemas de producción. El objetivo de la presente investigación fue determinar el rendimiento y la EUA de verdolaga y romerito cultivadas en sistema hidropónico con agua residual de tilapia (*Oreochromis niloticus*). Para ello, se establecieron cuatro repeticiones por especie y un tratamiento control (sin plantas) para comparar cambios en el volumen disponible de agua para consumo, durante un periodo de 28 días, sin recambio de agua ni adición de nutrientes. La verdolaga presentó los valores mayores de peso fresco y seco de tallo, área foliar y contenido relativo de agua (t de Student, $p \leq 0.05$). Mientras que el romerito presentó los valores mayores de clorofila a y b (t de Student, $p \leq 0.05$). La EUA y el rendimiento de biomasa fresca y seca fue mayor en verdolaga (t de Student, $p \leq 0.05$). La biomasa fresca cosechada de verdolaga y romerito fue de 319.65 ± 42.46 y 178.48 ± 12.48 g tina⁻¹, respectivamente, mientras que el consumo de agua promedio fue del 76 % en la verdolaga y del 91 % en el romerito. La conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y la salinidad del medio de cultivo se incrementaron en todos los tratamientos a través del tiempo; para dichas variables el efluente de romerito presentó los valores mayores. La presencia de plantas disminuyó significativamente la concentración de nitratos y P del medio de cultivo. El contenido de K y Mn en la biomasa aérea fue mayor en plantas de verdolaga, mientras que el Na y el Mg fueron mayores en plantas de romerito (t de Student, $p \leq 0.05$). Las plantas de verdolaga y romerito reflejaron respuestas adecuadas para cultivarse en sistema hidropónico con efluente acuícola de tilapia, sin embargo, la productividad se vio limitada debido a la disminución en el contenido de N y P con el transcurso del tiempo. Los resultados sugieren que la verdolaga es una especie vegetal con potencial mayor para la explotación agrícola con el sistema mencionado, debido a sus requerimientos nutricionales bajos, a un uso más eficiente de agua y a su valor nutricional alto, especialmente en regiones con tierras agrícolas y recursos hídricos limitados.

Palabras clave: hidroponía, verdolaga, romerito, productividad.

ORCID iD: 0000-0002-3143-5299

VoBo

Dr. Bernardo Murillo Amador
Director de Tesis



Summary

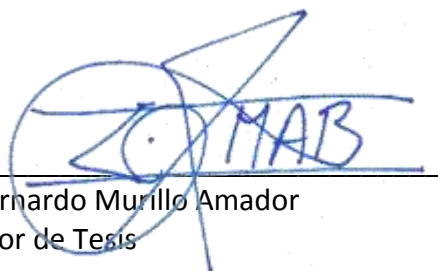
In arid and semi-arid regions, the water scarcity lead to a reduction in productivity. Faced with this problem, agriculture needs to reduce the amount of water required for crops and increase the water use efficiency (WUE). Aquaculture wastewater can reduce the use of water and fertilizers and can be used for growing plants in hydroponic systems. Purslane (*Portulaca oleracea* L.) and romerito (*Suaeda edulis* Flores Olv. & Noguez) are part of traditional Mexican cuisine and adapt well to the cultivation without soil, which allows the use of low-quality water along with hydroponic farming. The aim of this study was to determine the yield and WUE of purslane and romerito grown in experimental hydroponic units with effluent water from Nile tilapia culture (*Oreochromis niloticus*). Four repetitions per species and a control treatment (without plants) were established to compare changes in water consumption, for 28 days, without replenishment of nutrients or water lost. Purslane showed the highest stem fresh and dry weight, leaf area and relative water content ($p \leq 0.05$, Student's t-test). While romerito plants showed the highest values of chlorophyll a and b ($p \leq 0.05$, Student's t-test). Fresh harvested biomass of purslane and romerito were 319.65 ± 42.46 and 178.48 ± 12.48 g per hydroponic unit, respectively, while average water consumption was 76 % in purslane and 91 % in romerito. Electrical conductivity, total dissolved solids and salinity of growing media has increased over time in all treatments; romerito effluent showed the highest values. The presence of plants was found to significantly lower nitrate and P concentrations in wastewater effluent. Potassium and Mn showed higher concentration in the aerial biomass of purslane, while highest values of Na and Mg were presented in romerito plants ($p \leq 0.05$, Student's t-test). Purslane and romerito plants were found to be suitable for cultivation in hydroponic systems with tilapia effluent, however, the production, of these species appeared to be restricted due to the decrease in N and P content over time. Results showed that purslane reflected the highest potential for food production with the study scheme, due to its low nutritional requirements, more efficient use of water and its high nutritional value, especially in regions with limited agricultural land and water resources.

Keywords: *hydroponics, purslane, romerito, productivity.*

ORCID iD: 0000-0002-3143-5299

VoBo

Dr. Bernardo Murillo Amador
Director de Tesis



Dedicatoria

A la vida,

A mi padre,

Siempre presente en mi pensamiento

“Look again at that dot. That's here. That's home. That's us.”

— Carl Sagan, “Pale Blue Dot”, 1994

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C. por brindarme las bases para el desarrollo de esta investigación científica y por proporcionarme los recursos e instalaciones necesarias para cursar mis estudios de Maestría. A todo el personal académico y de servicios que conforma este Centro, particularmente al personal de la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos, del Departamento de Becas y Apoyo Estudiantil y del Departamento de Control Escolar por el trabajo realizado durante la pandemia de COVID-19 y a la Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro por brindar su apoyo en todo momento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca con número (CVU): 1082192.

A mi Comité Tutorial, Dr. Bernardo Murillo Amador por facilitar y proporcionar todos los medios para realizar esta investigación, al Dr. Enrique Troyo Diéguez y al Dr. Satoshi Yamada por las aportaciones a este trabajo.

A la Lic. Lidia Hiraes Lucero, Dra. Carmen Mercado Guido y a la M. en C. Ayenia Carolina Rosales Nieblas, del Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal, por la capacitación brindada y por su apoyo en el procesamiento de muestras. A la I.B.Q. Francisca Griselda Peña Armenta y al Q.B. Emerson Carlo Zúñiga Mayoral, del Laboratorio de Espectrofotometría de Absorción Atómica, por su ayuda en el procesamiento de muestras.

A los técnicos del campo agrícola, Pedro Luna García, Miguel Díaz Ramírez, Saúl Briseño Ruíz, José Raymundo Ceseña Núñez, Adrián Jordán Castro, y Álvaro González Michel por su apoyo en el montaje experimental.

A mi familia paceña Mariana, Rodrigo, Yoselyn, Imanol, Andrea, Luis Felipe, María José, Víctor y Valeria, sin ustedes esta experiencia no habría sido inolvidable, gracias por las aventuras.

A mis gordos, Lore, Kevs y Dan, que aquí siguen a pesar de la distancia. Y a Mau por sus buenos y malos consejos.

A mi familia humana y gatuna que dan alegría a mi vida. A mi mamá y mi hermana por su apoyo incondicional, gracias por guiarme en este camino llamado vida. Las amo.

Contenido

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	viii
Abreviaturas	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 La eficiencia en el uso del agua en la agricultura	3
2.2 Sistema hidropónico	4
2.3 Efluentes acuícolas	5
2.3.1 Producción de hortalizas con efluentes acuícolas	7
2.4 Los quelites	8
2.4.1 Importancia cultural y nutricional	9
2.4.2 Verdolaga	10
2.4.3 Romerito	11
2.4.4 Producción de verdolaga y romeritos en México	11
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. HIPÓTESIS	14
5. OBJETIVOS	15
5.1 Objetivo general	15
5.2 Objetivos particulares	15
6. MATERIAL Y MÉTODOS	16
6.1 Ubicación del experimento	16
6.2 Material vegetal	16
6.2.1 Siembra	16
6.2.2 Trasplante	16
6.3 Sistema hidropónico	17
6.3.1 Fuente de agua para el experimento	17
6.4 Diseño experimental	18
6.4.1 Cosecha	18
6.5 Variables morfométricas y fisiológicas de plantas de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i>	19
6.5.1 Biomasa fresca y seca	19
6.5.2 Área foliar	19
6.6 Contenido de clorofila	20
6.6.1 Método indirecto (SPAD)	20
6.6.2 Método directo	20
6.7 Contenido relativo de agua	20
6.8 Potencial hídrico	21
6.9 Rendimiento de biomasa fresca de verdolaga y romerito	21
6.10 Consumo y uso eficiente del agua	22
6.11 Parámetros de calidad y contenido de nutrientes del medio de cultivo	22

6.12 Contenido de nutrientes en la biomasa aérea	23
6.13 Análisis estadístico	23
7. RESULTADOS	25
7.1 Características morfológicas y fisiológicas de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>)	25
7.2 Rendimiento de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>)	26
7.3 Consumo y eficiencia en el uso del agua de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>).....	28
7.4 Parámetros de calidad y concentración de nutrientes en el medio de cultivo de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i>	30
7.4.1 Parámetros de calidad del medio de cultivo	30
7.4.2 Contenido de nutrientes en el medio de cultivo.....	33
7.5 Concentración de nutrientes en la biomasa aérea de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i>	36
8. DISCUSIÓN	37
8.1 Características morfológicas y fisiológicas de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>)	37
8.2 Rendimiento de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>)	40
8.3 Consumo y eficiencia en el uso del agua de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>).....	43
8.4 Parámetros de calidad y la concentración de nutrientes en el medio de cultivo de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i>	44
8.5 Concentración de nutrientes en la biomasa aérea de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i>	48
9. CONCLUSIONES	52
9.1 Perspectivas.....	53
10. LITERATURA CITADA	54

Lista de figuras

Figura 1. Biomasa fresca promedio (\pm DE) de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4). Se utilizaron 200 plantas para determinar el rendimiento. Valores promedio con literales diferentes indican diferencias significativas (t de Student, $p \leq 0.05$).	27
Figura 2. Biomasa seca promedio (\pm DE) de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4). Se utilizaron 200 plantas para determinar el rendimiento. Valores promedio con literales diferentes indican diferencias significativas (t de Student, $p \leq 0.05$).	27
Figura 3. Rendimiento promedio (\pm DE) de biomasa fresca de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4). Se utilizaron 200 plantas para determinar el rendimiento. Valores promedio con literales diferentes indican diferencias significativas (t de Student, $p \leq 0.05$).	28
Figura 4. Consumo de agua promedio (\pm DE) de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> y agua perdida en el tratamiento control durante las cuatro semanas utilizando el efluente de agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4).	29
Figura 5. Valores promedio (\pm DE) de A) temperatura, B) oxígeno disuelto, C) pH, D) conductividad eléctrica, E) sólidos disueltos totales y F) salinidad en el medio de cultivo de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> y el tratamiento control a través del tiempo (n=4).	32
Figura 6. Valores promedio (\pm DE) del contenido de sodio en el medio de cultivo de <i>P. oleracea</i> , <i>S. edulis</i> y el tratamiento control a través del tiempo (n=4).	33
Figura 7. Valores promedio (\pm DE) del contenido de A) nitratos, B) amoníaco, C) amonio, D) potasio, E) fósforo, F) magnesio y G) calcio en el medio de cultivo de <i>P. oleracea</i> , <i>S. edulis</i> y el tratamiento control al inicio del experimento, a los 15 días y al final (n=4).	35

Lista de tablas

Tabla 1. Producción nacional de verdolaga y romeritos.	12
Tabla 2. Parámetros de calidad y concentración de nutrientes en agua residual del cultivo de tilapia (<i>O. niloticus</i>). CE=Conductividad eléctrica, SDT=Sólidos disueltos totales y SAL=salinidad.	18
Tabla 3. Valores promedio de variables morfológicas cuantificadas en plantas de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=16).	25
Tabla 4. Valores promedio de variables fisiológicas cuantificadas en plantas de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=16).	26
Tabla 5. Valores promedio del consumo total de agua de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> y agua perdida en el tratamiento control durante las cuatro semanas de producción hidropónica con agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4).	29
Tabla 6. Eficiencia en el uso de agua de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4).	30
Tabla 7. Valores promedio del contenido de potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro y manganeso en la biomasa aérea de <i>P. oleracea</i> y <i>S. edulis</i> cultivadas en agua residual de tilapia (<i>O. niloticus</i>) (n=4).	36

Abreviaturas

CIBNOR	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
UNCCD	Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación
BFT	Sistema biofloc fotoautotrófico
Ca²⁺	Calcio
CA	Consumo de agua
CE	Conductividad eléctrica
Cl⁻	Cloro
CRA	Contenido relativo de agua
Cu²⁺	Cobre
EUA	Eficiencia en el uso del agua
Fe^{2+,3+}	Hierro
K⁺	Potasio
kg	Kilogramo
Mg²⁺	Magnesio
Mn²⁺	Manganeso
N	Nitrógeno
Na⁺	Sodio
NH₃	Amoníaco, nitrógeno amoniacal
NH₄⁺	Amonio
NO₂-N	Nitritos
NO₃⁻	Nitratos
NO₃-N	Nitratos
P	Fósforo
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PF	Peso fresco
pH	Potencial de Hidrógeno
PS	Peso seco
PVC	Polivinilo de cloruro
SAL	Salinidad
SDT	Sólidos disueltos totales
SO₄²⁻	Sulfato
SPAD	Soil plant analysis development
TCR	Tasa de crecimiento relativo
Zn²⁺	Zinc

1. INTRODUCCIÓN

En México las zonas áridas y semiáridas abarcan cerca del 58 % del territorio nacional y albergan al 41 % de la población (Díaz-Padilla *et al.*, 2011). Estas regiones se caracterizan por presentar notorias fluctuaciones entre las temperaturas del día y la noche, precipitaciones escasas y erráticas y suelos con contenido bajo de materia orgánica (UNCCD, 2011). Las temperaturas altas y el contenido bajo de humedad atmosférica; ya sea en forma de lluvia, rocío o neblina (Medrano-González, 2012), ocasionan que la evaporación potencial sea mayor a la precipitación media anual, ocasionando un déficit hídrico que limita el desarrollo de las actividades agropecuarias (Tarango-Arámbula, 2005). No obstante lo anterior, en estas zonas se lleva a cabo el 15.4 % de la agricultura a nivel nacional (SEMARNAT, 2019).

La degradación del suelo y la escasez de agua son factores que limitan la capacidad productiva del suelo en las zonas áridas. La degradación se debe principalmente a dos aspectos, a la variación climática extrema y a las actividades humanas, siendo una consecuencia irreversible de la sobreexplotación y del manejo inadecuado de la tierra, frecuentemente asociado a prácticas inadecuadas de riego que provocan la salinización y acidificación del suelo (UNCCD, 2011). Para combatir la escasez de agua, se ha recurrido al aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas. A nivel nacional, se destina el 76 % del agua concesionada para la agricultura de riego. De este porcentaje, el 36.4 % es de origen subterráneo (CONAGUA, 2018). Además, la sobreexplotación de los acuíferos, principalmente en las zonas costeras, ocasiona el descenso en los niveles freáticos de agua dulce provocando la intrusión de agua de mar, la salinización del agua de los pozos para uso agropecuario o doméstico y la salinización de las tierras agrícolas (Tarango-Arámbula, 2005; SEMARNAT, 2019).

Ante esta problemática, el sector agrícola requiere incrementar la eficiencia en el uso del agua y promover su uso de manera sustentable (Salazar-Moreno *et al.*, 2014). Para lograrlo, se debe reducir la cantidad de agua que es utilizada al mismo tiempo que se aumenta la producción (SEMARNAT, 2019), a través de prácticas agronómicas y tecnologías que conserven los recursos agua y suelo (Tarango-Arámbula, 2005).

La hidroponía es una técnica de producción que incrementa la eficiencia del uso del agua (Salazar-Moreno *et al.*, 2014). Esta técnica ofrece una alternativa para incrementar la producción de cultivos en zonas áridas y regiones donde existe competencia por los recursos agua y suelo. Una fuente hídrica alternativa que puede ser aprovechada a través de la hidroponía es el agua de desecho proveniente del cultivo de peces. Los efluentes acuícolas contienen diversas sustancias que producen impactos ambientales negativos, asociados principalmente al enriquecimiento de los cuerpos de agua en donde se descargan, toda vez que contienen cantidades considerables de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como partículas en suspensión y metales pesados (Buhmann y Papenbrock, 2013; Sosa Villalobos *et al.*, 2016). No obstante, dichos nutrientes pueden aprovecharse por las plantas, mediante la integración de la agricultura con la acuicultura a través de sistemas acuapónicos (Endut *et al.*, 2011). Lo anterior, permite reutilizar los efluentes acuícolas y utilizar los nutrientes contenidos en ellos para la producción de alimentos (Graber y Junge, 2009).

Los quelites, nombre como se conoce a una variedad amplia de especies vegetales silvestres comestibles, son un grupo de plantas con valor cultural y culinario en México (Castro Lara *et al.*, 2011). Dichas plantas requieren de poco manejo, aporte bajo de insumos y toleran condiciones climáticas desfavorables (Linares Mazari y Bye Boettler, 2015). Además, su valor nutricional alto (Santiago-Saenz *et al.*, 2019) las convierte en una fuente alternativa de alimento para contribuir a la seguridad alimentaria. Estas características sugieren que las referidas especies sean candidatas para cultivarse en sistema hidropónico, donde se aporten aguas de calidad baja para la producción de alimentos, reduciendo el impacto ambiental que ocasiona la descarga de los efluentes producidos al medio ambiente.

En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua de verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) y romerito (*Suaeda edulis* Flores Oliv. & Noguez) cultivadas en sistema hidropónico con efluente acuícola de *Oreochromis niloticus*, con el propósito de evaluar las diferencias en el consumo del efluente, analizar cambios en el contenido de nutrientes del medio de cultivo y en la concentración de minerales en la biomasa aérea.

2. ANTECEDENTES

2.1 La eficiencia en el uso del agua en la agricultura

En las zonas áridas, la escasez de agua ocasiona problemas de déficit y estrés hídrico que limitan la producción agrícola. Además, existe una competencia creciente por el agua, principalmente para uso doméstico, industrial y el sector turístico (Molden *et al.*, 2001), lo que incrementa el grado de presión sobre los recursos hídricos. Por lo anterior, es fundamental optimizar las técnicas de manejo de agua en este tipo de ambientes, las cuales deben estar dirigidas a incrementar la productividad agrícola y a mejorar los agroecosistemas (Troyo-Diéguez *et al.*, 2010). Una estrategia clave es aumentar la productividad del agua para lograr la misma producción pero con menos recursos (Molden *et al.*, 2001).

La eficiencia en un proceso de producción que se entiende como la relación entre los productos y los insumos involucrados en el mismo (Hsiao *et al.*, 2007). La eficiencia en el uso del agua (EUA) es la relación que existe entre la cantidad de agua utilizada por las plantas y la producción de biomasa en un cultivo (Salazar-Moreno *et al.*, 2014). La EUA es un indicador en áreas donde las fuentes de agua son limitadas y en consecuencia es de suma relevancia para calcular el valor económico del agua utilizada para riego y así maximizar su uso en la producción de alimentos (Salazar-Moreno *et al.*, 2014).

En México se utiliza el 76 % del agua concesionada para la producción agrícola, principalmente para riego; sin embargo, la EUA en este sector es apenas del 46 % (FCEA, 2017). No obstante, el rendimiento en toneladas por hectárea con riego es de dos a tres veces mayor que la superficie con régimen de temporal (CONAGUA, 2018). A nivel nacional, la superficie sembrada de riego en el 2017 fue de 6.5 millones de hectáreas (CONAGUA, 2018), las cuales aportaron más de la mitad de la producción agrícola a nivel nacional (FCEA, 2017). Sin embargo, datos de la CONAGUA (2010)[citado en (Chávez *et al.*, 2010, p. 232)] estiman que sólo del 15 a 50 % del agua que se extrae para riego llega a los cultivos de manera localizada. Lo anterior se atribuye a que gran parte se pierde por evaporación o durante el proceso de conducción antes de ser absorbida por las plantas. En los distritos de riego la infraestructura hidroagrícola prevaleciente en las parcelas es el riego por gravedad, que en ocasiones comprende únicamente redes de

canales y drenes principales, que conjuntamente con el deterioro de la infraestructura, propician la disminución en la eficiencia global del manejo del agua (CONAGUA, 2018).

En Baja California Sur, la actividad agrícola desarrollada es totalmente de riego (SADER, 2018), por lo que se destina un volumen aún mayor del agua disponible para esta actividad (81 %) de la cual, el 91 % proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2018). Dichos datos sugieren la necesidad de adoptar prácticas y desarrollar tecnologías dirigidas a disminuir la cantidad de agua que se utiliza y aumentar la eficiencia en su uso para maximizar la producción agrícola. Lo anterior es posible utilizando técnicas de producción que aseguren los rendimientos mínimos para que sea una actividad viable, como el uso de invernaderos, sistemas hidropónicos o la combinación de ambas técnicas.

2.2 Sistema hidropónico

La hidroponía es un sistema para cultivar plantas sin suelo, el cual utiliza una solución nutritiva compuesta con los nutrientes necesarios para el crecimiento vegetal, utilizando como alternativa un material inerte y estéril como sustrato, que funciona como medio de soporte artificial, el cual puede ser arena, grava, perlita, vermiculita o aserrín, entre otros (Jensen, 1997; Salazar-Moreno *et al.*, 2014). La hidroponía, en combinación con el uso de invernaderos, es una tecnología que produce especies con calidad y rendimiento mayores, permite un uso eficiente del agua, regula el aporte de nutrientes y fertilizantes y protege a las especies cultivadas de cambios ambientales (Jensen, 1997; Salazar-Moreno *et al.*, 2014). En los Estados del norte de México, factores como la precipitación pluvial escasa y las temperaturas extremas son el motivo principal para implementar este tipo de sistemas, debido a que minimizan la pérdida de agua y se mantiene la producción a nivel económicamente rentable (López-Anchondo *et al.*, 2016).

Los sistemas hidropónicos pueden ser abiertos o cerrados; en el primero, la solución nutritiva es renovada de manera continua haciéndolo ineficiente en el uso de agua y nutrientes; sin embargo, este sistema puede mejorarse restringiendo la descarga para ahorrar agua y fertilizantes (Jensen, 1997; Salazar-Moreno *et al.*, 2014). En el sistema hidropónico cerrado, el agua de desecho se recupera y recicla, reajustando la solución nutritiva mediante la adición de

agua y nutrientes conforme son utilizados por las plantas (Jensen, 1997; Salazar-Moreno *et al.*, 2014).

El sistema hidropónico presenta las ventajas siguientes (López-Anchondo *et al.*, 2016; Fussy y Papenbrock, 2022):

- Permite su automatización, que reduce la pérdida de agua y permite el manejo controlado de fertilizantes.
- Uso eficiente del agua, nutrientes y otros insumos.
- Permite reutilizar aguas de desecho de otros sistemas de producción.
- Permite el desarrollo agrícola en zonas inutilizadas para agricultura tradicional, tales como las regiones áridas donde la escasez de agua limita la actividad agrícola.
- No requiere control de malezas y el costo para el control de plagas es bajo.
- Aumenta el número de cosechas y la biomasa producida por unidad de superficie.
- En combinación con el uso de invernaderos permite controlar las condiciones ambientales.
- Permite cultivar una variedad de cultivos, entre ellos, especies de vida corta, como las hortalizas, que permite mantener la producción durante todo el año.

El sistema hidropónico presenta ciertas limitantes como son: costo inicial elevado, requiere de una fuente segura de agua potable y mantiene el aporte de nutrientes para su funcionamiento (Salazar-Moreno *et al.*, 2014). Sin embargo, permite cultivar en regiones donde los recursos son limitados lo que ofrece nuevos enfoques para la producción de alimentos (Fussy y Papenbrock, 2022).

2.3 Efluentes acuícolas

La acuicultura es un sector productivo en crecimiento a nivel mundial y representa una alternativa clave para cubrir el aumento en la demanda de alimentos, porque provee de alimentos con valor nutricional alto a un costo hidrológico y ambiental menor (Sosa Villalobos *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2019). En los países en desarrollo se lleva a cabo más del 90 % de la producción acuícola a nivel mundial, la cual contribuye directamente a la seguridad alimentaria por el consumo interno o bien, de manera indirecta como fuente de ingresos a través de la

exportación (Anderson *et al.*, 2017). En varias regiones del mundo, los productos acuícolas son la fuente principal de proteína animal, toda vez que representan el 43 % del suministro total de mariscos y el 50 % del pescado destinado para consumo humano directo (Anderson *et al.*, 2017).

A pesar de lo anterior, la producción acuícola tiene efectos ambientales negativos: 1) disminuye las poblaciones de peces silvestres, según la especie, debido al aumento en la captura de reproductores, juveniles y de pescado para la producción de alimento; 2) aumenta la competencia por tierra y agua de buena calidad, ocasionando frecuentemente la destrucción del hábitat para el establecimiento de granjas; 3) contribuye a contaminar y reducir la calidad del agua de los efluentes por la aplicación de antibióticos, fertilizantes y hormonas, mientras que la sobrepoblación de los estanques y la sobrealimentación producen materia orgánica y desechos. Además, la adición de fertilizantes químicos y abonos orgánicos aumentan el contenido de nitrógeno (N) y fósforo (P), ocasionando problemas de eutrofización; 4) amenaza a las especies nativas; el escape de especies exóticas de los tanques de producción tiene efectos ecológicos como competencia por alimento y hábitat, ocasionando problemas de cruzamiento y mestizaje; 5) ocasiona el brote de enfermedades y la transmisión de parásitos debido a la condiciones en las que se desarrolla la acuicultura intensiva, como son la calidad baja del agua y la presencia de toxinas (Anderson *et al.*, 2017; Ahmed *et al.*, 2019).

No obstante, los sistemas acuícolas presentan índices mayores de conversión de alimentos y uso menor de agua comparados con otros sistemas de producción (Anderson *et al.*, 2017). La acuicultura integrada en el sistema acuicultura-agricultura, mejora la eficiencia en el manejo de los recursos, aumenta la productividad y la rentabilidad agrícola (Dey *et al.*, 2010). De esta manera, la integración de la acuicultura y la hidroponía, en sistemas acuapónicos, permite ahorrar agua, reutilizar aguas residuales y fertilizar cultivos (Graber y Junge, 2009; Endut *et al.*, 2011), reduciendo la concentración de nutrientes como nitrógeno amoniacal (NH_3), nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$), nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$) y ortofosfatos en el efluente (Endut *et al.*, 2011).

Los efluentes acuícolas son una fuente hídrica y de nutrientes con potencial para ser utilizados en el cultivo de plantas; su uso tiene el potencial de reemplazar a la fertilización inorgánica y evitar su descarga al medio ambiente (Valencia *et al.*, 2001).

2.3.1 Producción de hortalizas con efluentes acuícolas

Estudios previos que evalúan el uso de efluentes acuícolas como sustituto a la fertilización inorgánica para la producción de diferentes especies de hortalizas sugieren que los efluentes proporcionan el agua y los elementos nutritivos requeridos por las plantas. Rosales-Nieblas (2022) determinó la respuesta morfológica y fisiológica de verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) y epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) a diferentes dosis de microelementos y dos tipos de sustratos (esponja y sustrato comercial + vermiculita) utilizando efluente acuícola de *Oreochromis niloticus*. Los resultados determinaron que la biomasa en la verdolaga incrementó en los tratamientos con 100 % de microelementos y sustrato comercial + vermiculita, en tanto que para el epazote a dosis de 100 % de microelementos y utilizando esponja como sustrato. Por otra parte, el consumo de agua no presentó diferencias significativas entre las dosis evaluadas en ambas especies.

Omeir y colaboradores (2020) evaluaron el efecto de tres tipos de agua de riego (agua de río, efluente acuícola y efluente mixto) sobre las tasas de crecimiento y el contenido de macro y micronutrientes en verdolaga y albahaca. Encontraron que el peso fresco y seco de la biomasa aérea y de raíces, el número de hojas y la altura del tallo en ambas especies, aumentó significativamente en las plantas regadas con efluente acuícola. Además, se incrementó la concentración de P, Mg y Cu en las plantas de verdolaga y de N, P, K, Cu y Mn en albahaca.

Fimbres-Acedo y colaboradores (2020) caracterizaron el efluente acuícola de *O. niloticus* proveniente de un sistema biofloc fotoautotrófico (BFT) inoculado con la microalga *Chlorella*. Los tratamientos evaluados fueron cinco, tres BFT inoculados con *Chlorella* sp., *C. sorokiniana* 2714 y *C. sorokiniana* 2805, un tratamiento quimioautotrófico y uno heterótrofico como controles. Las especies evaluadas en hidroponía fueron lechuga (*Lactuca sativa*), pak-choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*), arúgula (*Eruca sativa*), espinaca (*Spinacia oleracea*) y albahaca (*Ocimum basilicum*). Los resultados mostraron que, el contenido de nitratos y fosfatos que se retuvo mediante el sistema biofloc fue óptimo para el cultivo de estas especies. Además, reportaron que, es posible utilizar la combinación espinaca, pak-choi y/o arúgula con efluente de *O. niloticus* para producción acuapónica. El estudio concluye indicando que, los efluentes mejores respecto al crecimiento de peces y plantas fueron los tratamientos fotoautotróficos.

Por otra parte, da Rocha y colaboradores (2017) evaluaron el desarrollo de plantas de *L. sativa* en sistemas hidropónicos y acuapónicos con o sin biofloc, utilizando efluente de bagre negro (*Rhamdia quelen*). Los resultados mostraron que, la productividad de lechuga fue significativamente mayor en los sistemas acuapónicos respecto a los sistemas hidropónicos, concluyendo que es posible utilizar sistema acuapónico y este efluente para mejorar la producción de lechuga.

Effendi y colaboradores (2017) evaluaron el crecimiento de lechuga romana (*L. sativa* L. var. *longifolia*) en un sistema acuapónico con tilapia del Nilo (*O. niloticus*) y sin adición de nutrientes. Los resultados muestran que ambas especies pueden desarrollarse de manera conjunta en un sistema acuapónico, sin que la lechuga muestre signos de deficiencia nutricional. Asimismo, determinaron que, la integración acuapónica tilapia-lechuga romana es un sistema prometedor para la producción sostenible de peces y hortalizas, porque permite mantener la calidad del agua para su crecimiento, sin necesidad de reemplazar el agua regularmente como en un sistema de producción convencional.

2.4 Los quelites

El término quelite se utiliza en México para referirse a una amplia variedad de plantas nativas silvestres de las que se aprovechan preferentemente hojas, brotes, tallos tiernos y ocasionalmente algunas flores (Bye Boettler y Linares Mazari, 2000; Santiago-Saenz *et al.*, 2019). El nombre deriva del término *quilitl*, que, en náhuatl se utiliza para nombrar hierbas comestibles, consumidas como verduras (Bye Boettler y Linares Mazari, 2000; Castro Lara *et al.*, 2011).

Los quelites se distribuyen en todo México, aunque diversas especies como los berros y la malva que son originarias de Europa, se adoptaron en varias regiones (Castro Lara *et al.*, 2011; Castro-Lara *et al.*, 2014). Existen alrededor de 500 especies de plantas consideradas quelites en el sentido amplio del concepto (Castro Lara *et al.*, 2011; Linares Mazari y Bye Boettler, 2015), sin embargo, si se consideran aquellas especies de las que se consumen únicamente las hojas tiernas, se conocen cerca de 250 especies (Castro-Lara *et al.*, 2014). Las familias con el número mayor de especies son, Fabaceae, Begoniaceae, Asteraceae, Amaranthaceae, Brassicaceae y Solanaceae (Bye Boettler y Linares Mazari, 2000; Castro Lara *et al.*, 2011).

Las especies que más se utilizan en regiones diversas de México son: la verdolaga (*Portulaca oleracea*), el amaranto o quintonil (*Amaranthus* spp.), el epazote (*Dysphania ambrosioides*), el pápalo (*Porophyllum ruderale* subsp. *macrocephalum*), el quelite cenizo (*Chenopodium berlandieri*) y la yerba mora (*Solanum americanum*, *Solanum nigrescens*), entre otras (Linares Mazari y Bye Boettler, 2015).

2.4.1 Importancia cultural y nutricional

Los quelites se utilizan desde épocas prehispánicas y en la actualidad se consumen principalmente por comunidades indígenas y rurales (Castro Lara *et al.*, 2011), que son las áreas donde se encuentra la biodiversidad mayor asociada al cultivo de milpa (Linares Mazari y Bye Boettler, 2015). Los quelites se cultivan en asociación con otras plantas o en monocultivos; algunos tienen cierto grado de manejo; se tolera como invasora o bien, en su caso, se induce su crecimiento dentro de las parcelas; también se obtienen a partir de la recolección de las poblaciones silvestres (Castro Lara *et al.*, 2011; Castro-Lara *et al.*, 2014).

Los quelites forman parte de la cultura gastronómica de México, sea como alimento o como condimento; su oferta en mercados y tianguis locales muestra su importancia como componente esencial de la dieta de grupos étnicos, quienes las consumen de manera cotidiana. También componen la dieta complementaria de gran parte de la población mexicana y en numerosas ocasiones constituyen el plato fuerte de la comida tradicional (Castro Lara *et al.*, 2011; Linares *et al.*, 2017). Los quelites presentan valor nutricional alto, por su contenido de minerales ($\text{Fe}^{2+,3+}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+}), vitaminas (A y C), su contenido elevado de proteínas y aminoácidos y contenido de fibra (Santiago-Saenz *et al.*, 2019). Además, son una fuente excelente de nutraceuticos y antioxidantes, como compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides, ácido α -linolénico y betalainas (Velázquez-Ibarra *et al.*, 2016; Román-Cortés *et al.*, 2018).

El consumo de quelites ha disminuido considerablemente debido al uso de químicos para el control de malezas, a la pérdida de hábitats y a la modificación de las preferencias alimentarias, generadas por cambios socioeconómicos, culturales y a la migración (Castro Lara *et al.*, 2011; Castro-Lara *et al.*, 2014). Estas plantas requieren de poco manejo, aporte bajo de insumos y

toleran condiciones climáticas desfavorables, factores que las convierten en candidatas para cultivarse en el sistema de producción orgánica (Linares Mazari y Bye Boettler, 2015). Además, existe un mercado potencial para su cultivo como una propuesta de “superalimentos”, ante la demanda creciente de alimentos naturales no procesados (Castro-Lara *et al.*, 2014; Linares Mazari y Bye Boettler, 2015) y con valor nutricional alto.

2.4.2 Verdolaga

La verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) es una especie herbácea, anual que pertenece a la familia Portulacaceae dentro del Orden de las Caryophyllales (Mera *et al.*, 2010; Missouri Botanical Garden, 2022). Presenta hábito decumbente y alcanza de 5 a 40 cm de alto, tallos cilíndricos y con ramificaciones y hojas suculentas, obovado-cuneadas a espatuladas. Sus flores son actinomorfas, sésiles y de color amarillo, se presentan individualmente o agrupadas de 2 a 3 flores. Las semillas son reniformes de 1 mm de ancho y de color negro; conservan capacidad de germinación de 8 a 10 años (Mera *et al.*, 2010).

Esta especie se encuentra presente en Norteamérica en regiones de clima templado y tropical. En México, se distribuye en todo el territorio nacional y se caracteriza por ser arvense o maleza; se encuentra generalmente a la orilla de caminos y ríos, desarrollándose en parcelas de cultivo o bien, en huertos familiares (Mera *et al.*, 2010; Castro Lara *et al.*, 2011).

La producción de verdolaga se realiza a partir de semillas y su siembra se lleva a cabo durante todo el año (SIAP, 2019a). Esta especie se cultiva principalmente a cielo abierto mediante siembra directa, aunque durante el periodo de heladas es preferible cultivarla en invernadero (Mera *et al.*, 2010). De la verdolaga se aprovechan las hojas, para lo cual se cortan los tallos en estado inmaduro (SIAP, 2019a), se cosechan o arrancan desde la raíz de 25 a 30 días después de la siembra (Mera *et al.*, 2010).

La verdolaga es una fuente de minerales como K^+ , Ca^{2+} , $Fe^{2+,3+}$, Mg^{2+} y Zn^{2+} , de antioxidantes como betacarotenos (Alam *et al.*, 2014) y de ácidos grasos poliinsaturados omega 3 (ácido α -linoleico) y omega 6 (ácido linoleico) (Anastácio y Carvalho, 2013), características que la convierten en un recurso fitogenético con potencial para la alimentación (Castro Lara *et al.*, 2011).

2.4.3 Romerito

El romerito (*Suaeda edulis* Flores Olvera & Noguez) pertenece a la familia Amaranthaceae en el Orden de las Caryophyllales (Missouri Botanical Garden, 2022). Es una planta herbácea, anual, erecta a ascendente con alturas de 15 a 110 cm, tiene tallos estriados no ramificados y presenta hojas alternas, suculentas, angostamente lanceoladas. Las inflorescencias están formadas por glomérulos axilares que presentan de 1 a 3 flores y se encuentran a lo largo de las ramas o dispuestas en espigas (Noguez-Hernández *et al.*, 2013). Tiene semillas dimórficas, negras o pardo claro, lenticulares, de 0.9 a 1.6 mm de ancho (Noguez-Hernández *et al.*, 2013).

Esta especie se colecta y cultiva principalmente en el Valle de México; crece en zonas salinas y suelos inundados y en lagos salinos de los estados de Guanajuato, Jalisco, Michoacán, México, Distrito Federal, Tlaxcala y Puebla (Noguez-Hernández *et al.*, 2013).

Es una especie comestible que se obtiene mediante recolección de poblaciones silvestres o mediante su cultivo; de ella se aprovechan las hojas y los tallos (SIAP, 2019b); contiene minerales como P, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺ y Fe^{2+,3+} (Román-Cortés *et al.*, 2018). Esta planta se cosecha en estado juvenil a los 60 o 70 días después de la siembra (SIAP, 2019b) y se utiliza principalmente en festividades religiosas como Navidad y Semana Santa (Noguez-Hernández *et al.*, 2013).

2.4.4 Producción de verdolaga y romeritos en México

Los quelites son especies de poca importancia económica, por su precio bajo que oscila de los dos a los 15 pesos por kg y por la superficie reducida de cosecha (Castro Lara *et al.*, 2011; Castro-Lara *et al.*, 2014). Las especies cultivadas para comercialización son la verdolaga, el huazontle, el pápalo, la pipicha, el chepiche, los quintoniles y los romeritos, cuyo cultivo se realiza principalmente por agricultores cuya superficie de cultivo es pequeña (CONABIO, 2020). En un estudio realizado en doce mercados ubicados en la Ciudad de México, Valles Centrales de Oaxaca y de los Altos de Chiapas, se encontraron a la venta 28 especies de quelites pertenecientes a 16 familias botánicas (Castro *et al.*, 2009) [citado en (Castro Lara *et al.*, 2011, p. 21.)] en cuya lista se incluyen la verdolaga (*P. oleracea*) y los romeritos (*S. torreyana*).

En la Tabla 1 se muestra la superficie nacional destinada para la producción de verdolaga y romeritos de acuerdo con estadísticas oficiales del SIAP para 2019. El Estado con producción

mayor de verdolaga fue Morelos con 2,225 t, mientras que el Estado de México fue el productor mayor de romeritos con 2,112 t. No se tienen registros de producción de estas especies en el Estado de Baja California Sur para el mismo año (SIAP, 2019c), ni años previos. En 2020 y 2021 sólo se tiene registro de producción de romerito.

Tabla 1. Producción nacional de verdolaga y romeritos.

Cultivo	Superficie		Producción (t)	Valor Producción (miles de pesos)
	Sembrada	Cosechada		
Verdolaga	421.03	420.03	5,474.15	26,361.30
Romeritos	406.80	406.80	3,775.87	16,911.54

La demanda creciente en las ciudades altamente pobladas de México, ha ocasionado que especies de quelites como el pápalo, la verdolaga, el quintonil, los romeritos y el huauzontle se produzcan a escala mayor (Linares Mazari y Bye Boettler, 2015). En el caso de la verdolaga, la producción se concentra en Morelos y la Ciudad de México y se destina principalmente a la Central de Abastos para su redistribución a la capital y para exportar a los Estados Unidos de América (Linares Mazari y Bye Boettler, 2015).

3. JUSTIFICACIÓN

En las zonas áridas y semiáridas del mundo, el aumento de la demanda de agua y suelo, así como la salinización gradual e irreversible de dichos recursos, ha impulsado el desarrollo de técnicas que reducen la pérdida de agua y facilitan el uso seguro de recursos hídricos no convencionales para fines agronómicos. Por otra parte, la producción acuícola genera aguas de desecho con alto contenido de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y otros contaminantes que ocasionan impactos ambientales negativos, entre ellos, la disminución de la calidad del agua.

En este sentido, la hidroponía en conjunto con el aprovechamiento de los efluentes acuícolas ofrece una alternativa para producir hortalizas y otras especies vegetales; el agua de desecho reemplaza la fertilización inorgánica y ofrece una fuente de agua, mientras que las plantas pueden ser utilizadas como biofiltro para eliminar nutrientes y sales del medio. Especies vegetales como *Portulaca oleracea* y *Suaeda edulis* presentan valor nutricional alto y muestran capacidad para cultivarse en sistema hidropónico.

Mediante este estudio se espera aportar datos que permitan utilizar los efluentes acuícolas en la producción hidropónica de estas especies, para que puedan ser incorporadas en los sistemas de producción agrícola de la región. A fin de incrementar la producción de alimentos, hacer frente a la escasez de agua y aprovechar zonas inutilizadas por la agricultura tradicional.

4. HIPÓTESIS

¿Qué especie presenta factibilidad para cultivarse en un sistema hidropónico con agua residual de acuicultura, con un rendimiento y uso eficiente de agua aceptable, similar o mayor a los de hortalizas convencionales?

Si existe entre las especies de estudio (*Portulaca oleracea* y *Suaeda edulis*) una respuesta diferencial en el desarrollo morfológico y fisiológico, bajo condiciones de cultivo hidropónico con efluente acuícola, entonces, se espera que estas diferencias se expresen en el rendimiento de biomasa y en la eficiencia en el uso del agua.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Determinar el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua de verdolaga (*Portulaca oleracea*) y romerito (*Suaeda edulis*) cultivadas en un sistema hidropónico con agua residual de acuicultura de *Oreochromis niloticus*.

5.2 Objetivos particulares

- 1) Evaluar las características morfométricas y fisiológicas de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de acuicultura.
- 2) Determinar el rendimiento de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de acuicultura.
- 3) Determinar el consumo y la eficiencia en el uso del agua de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de acuicultura.
- 4) Evaluar los parámetros de calidad y la concentración de nutrientes en el medio de cultivo de *P. oleracea* y *S. edulis*.
- 5) Determinar la concentración de nutrientes en la biomasa aérea de *P. oleracea* y *S. edulis*.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el campo experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR) localizado en La Paz, Baja California Sur (24° 08' 10.75" N, 110° 24' 40.92" O). La zona se caracteriza por presentar un clima muy seco, muy cálido, cálido BW(h') y vegetación de matorral (INEGI, 2017). El experimento se desarrolló dentro de una malla anti-áfidos de color blanco cristal de 10 × 12 hilos cm⁻². Las variables climáticas se registraron mediante una estación meteorológica portátil (Vantage Pro2 Davis Instruments®, EUA) que se instaló al interior de la estructura malla-sombra. Las variables se registraron diariamente cada hora durante el periodo de experimentación; los valores promedio fueron los siguientes: temperatura 18.96 ± 0.17 °C, humedad relativa 61.54 ± 0.51 %, punto de rocío 10.44 ± 0.08 °C y radiación fotosintéticamente activa (PAR) 244.25 ± 18.67 μM m² s⁻¹.

6.2 Material vegetal

Las semillas utilizadas fueron de verdolaga (*Portulaca oleracea*) de hoja ancha de la marca CITSA®, lote 3G228Z21VHQ4 con 85 % de germinación y semillas de romerito (*Suaeda edulis*) adquiridas con un agricultor local de Xochimilco en la Ciudad de México.

6.2.1 Siembra

Las semillas de cada especie se sembraron por separado en bandejas de plástico para germinación sin cavidades y con orificios de drenaje. Cada bandeja contenía como sustrato turba de musgo *Sphagnum* (Peat moss, Theriault & Hachey Peat Moss Ltd., Canadá), vermiculita (Fosforita de México, S.A. de C.V., Puebla, México) y lombricomposta 3:1:1 (v:v:v). La fecha de siembra para romerito fue 27/01/2022 y para verdolaga 30/01/2022. Las bandejas se regaron diariamente para mantener la humedad y asegurar la emergencia homogénea de plántulas.

6.2.2 Trasplante

El trasplante se llevó a cabo cuando las plántulas de cada especie alcanzaron una altura de 5 a 10 cm. Se trasplantaron 200 plántulas de cada especie en bandejas de unicel de 50 cavidades con sustrato turba de musgo *Sphagnum* (Peat moss, Theriault & Hachey Peat Moss Ltd., Canadá)

y vermiculita (Fosforita de México, S.A. de C.V., Puebla, México) con una relación 3:1 (v:v); para ello se colocaron cuatro plántulas por cavidad.

6.3 Sistema hidropónico

El sistema hidropónico consistió en 12 cajas de plástico (NOVATEC, modelo Mérida, México) con capacidad de 50 L y las dimensiones externas siguientes, 37.5 cm de ancho, 67.5 cm de largo y 25.5 cm de alto (0.253 m² de superficie). Las cajas plásticas se aforaron con 30 L de efluente acuícola residual proveniente de tanques con cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*).

El sistema se mantuvo conectado a un sistema de aireación conformado por un aireador y mangueras plásticas conectadas a una tubería de cloruro de polivinilo (PVC) de dos pulgadas de diámetro. El sistema de aireación estuvo en funcionamiento las 24 horas del día, instalando un conducto de aire por caja hidropónica.

Las plántulas se colocaron dentro de bandejas de germinación de poliestireno de 200 cavidades para facilitarles soporte, las cuales se modificaron para dejar 50 cavidades por bandeja (resultado de la unión de cada cuatro cavidades). Cada bandeja contenía como sustrato turba de musgo *Sphagnum* (Peat moss, Theriault & Hachey Peat Moss Ltd., Canadá) y vermiculita (Fosforita de México, S.A. de C.V., Puebla, México) en una relación 3:1 (v:v); se colocó una charola de germinación por caja.

6.3.1 Fuente de agua para el experimento

El agua del sistema acuícola la proporcionó el equipo de investigación dedicado a la crianza de tilapia en el CIBNOR. La calidad del agua se analizó para determinar la concentración de nutrientes del efluente (Tabla 2). El pH y la temperatura se midieron con un potenciómetro biparamétrico (Thermo Scientific® Orion Star A221, EUA); para medir la conductividad eléctrica (CE), los sólidos disueltos totales (SDT) y la salinidad se utilizó un conductímetro portátil (Thermo Scientific® Orion Star A222, EUA) y la concentración de oxígeno disuelto se midió con un medidor portátil (Thermo Scientific® Orion Star A323, EUA).

La concentración de nitratos (NO₃⁻), amoníaco (NH₃), amonio (NH₄⁺), potasio (K⁺), fósforo (P), sulfato (SO₄²⁻), magnesio (Mg²⁺) y calcio (Ca²⁺) se determinaron con el fotómetro

multiparamétrico (Hanna® Instruments HI83300-01, EUA) y el contenido de sodio (Na^+) con el medidor portátil LAQUAtwin Na11 (Horiba®, B-722, EUA). Las citadas mediciones se realizaron en el laboratorio de fisiotecnia vegetal.

Tabla 2. Parámetros de calidad y concentración de nutrientes en agua residual del cultivo de tilapia (*O. niloticus*). CE=Conductividad eléctrica, SDT=Sólidos disueltos totales y SAL=salinidad.

Variable		Valor
pH		8.7
Temperatura	(°C)	18.6
CE	(mS cm^{-1})	3.154
SDT	(ppt)	1.546
SAL	(PSU)	1.631
Oxígeno disuelto	(mg L^{-1})	11.39
Sodio (Na^+)	(ppm)	340
Nitratos (NO_3^-)	(mg L^{-1})	260
Amoníaco (NH_3)	(mg L^{-1})	23
Amonio (NH_4^+)	(mg L^{-1})	24
Potasio (K^+)	(mg L^{-1})	850
Fósforo (P)	(mg L^{-1})	37
Sulfato (SO_4^{2-})	(mg L^{-1})	400
Magnesio (Mg^{2+})	(mg L^{-1})	88
Calcio (Ca^{2+})	(mg L^{-1})	203

6.4 Diseño experimental

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones para cada especie vegetal, incluyendo un tratamiento control (sin plantas) para comparar cambios en el volumen de agua disponible y en la concentración de nutrientes en el medio de cultivo. Las cajas se colocaron de forma intercalada y cada tina representó una unidad experimental.

6.4.1 Cosecha

La cosecha de las plantas por tratamiento y repetición se realizó al final del experimento, 28 días después del trasplante, cuando las plantas presentaron una altura promedio entre 12 y 16 cm. La cosecha (corte) de las plantas se realizó en la base de la planta utilizando para ello unas tijeras para poda.

6.5 Variables morfométricas y fisiológicas de plantas de *P. oleracea* y *S. edulis*

6.5.1 Biomasa fresca y seca

Para el trasplante se seleccionaron cinco plantas de verdolaga y cinco de romerito. Cada planta se separó del sustrato y se lavó con agua corriente; inmediatamente se secaron con un papel absorbente y se pesaron en una balanza analítica (Mettler® Toledo, AG204, EUA) registrando el peso fresco de biomasa. Cada planta se separó en biomasa aérea (hojas y tallos) y biomasa de raíces; posteriormente cada segmento se pesó para obtener el peso fresco (PF). Las muestras frescas se colocaron en bolsas de papel y fueron secadas en estufa (Terlab®, TE-H80DM, Jalisco, México) a 70 °C hasta llevar las muestras a peso constante; posteriormente se pesaron y se registró el peso seco (PS).

Al final del experimento, se seleccionaron al azar cuatro plantas de cada unidad experimental para obtener los datos de biomasa siguiendo la metodología antes descrita; adicionalmente se midió la longitud del tallo.

La tasa de crecimiento relativo (TCR) se calculó usando la ecuación siguiente (Fisher, 1921):

$$\text{TCR} = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Dónde:

W_1 y W_2 : peso seco inicial y final de la planta (g), respectivamente.

t_1 y t_2 : indican el inicio y final de los tratamientos.

6.5.2 Área foliar

De cada unidad experimental se seleccionaron cuatro plantas al azar. El área foliar de cada planta se midió con un equipo integrador de área foliar (LI-3000A, Li-Cor® Bioscience, Nebraska, EUA).

6.6 Contenido de clorofila

6.6.1 Método indirecto (SPAD)

El contenido de clorofila en hojas de verdolaga y romerito se cuantificó de forma indirecta con un medidor portátil (SPAD-502 Plus, Minolta® Japón), el cual es un método no destructivo que permite estimar el contenido de clorofila con base en lecturas de fluorescencia (Fenech-Larios *et al.*, 2009). De cada unidad experimental se tomaron cuatro plantas al azar; a su vez, de cada planta se seleccionaron tres hojas sanas y completamente desarrolladas. Se midieron tres registros por hoja, obteniendo la media representativa.

6.6.2 Método directo

El contenido de clorofila a, b y total se cuantificó de las plantas utilizadas para determinar la clorofila con método de laboratorio (destructivo directo).

La extracción de clorofila se realizó utilizando 0.5 g de material fresco. Las muestras se colocaron en tubos de ensayo con una solución de acetona al 80 %, las cuales se mantuvieron en oscuridad por 72 h; las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro UV (Hach® DR-3900, RU).

La concentración de clorofila se calculó con las ecuaciones propuestas por Strain y Svec (1966):

$$Chl\ a\ (\mu g\ cm^2) = \frac{(12.70 \times A663) - (2.6 \times A645)}{3.9} \quad (2)$$

$$Chl\ b\ (\mu g\ cm^2) = \frac{(A645 \times 22.9) - (A663 \times 4.68)}{3.9} \quad (3)$$

$$Chl\ total\ (\mu g\ cm^2) = \frac{Chl\ a + Chl\ b}{3.9} \quad (4)$$

Dónde:

A663: absorbancia 663 nm.

A645: absorbancia 645 nm.

6.7 Contenido relativo de agua

La variable relacionada con el contenido relativo de agua (CRA) se determinó a través del método de Yamasaki y Dillenburg (1999), tomando tres plantas de cada unidad experimental, de

las cuales se seleccionaron tres hojas sanas, completas y de tamaño similar. El PF de cada hoja se determinó con una balanza analítica (Mettler® Toledo, AG204, EUA); una vez calculado el PF, las hojas se colocaron en cajas de Petri de plástico y se cubrieron con agua destilada por 24 h para obtener el peso turgente (PT). Las muestras se secaron en estufa (Terlab®, TE-H80DM, Jalisco, México) a 70 °C para obtener el peso seco constante (PS). El CRA se calculó con la ecuación siguiente:

$$\text{CRA}(\%) = \left[\frac{\text{PF}-\text{PS}}{\text{PT}-\text{PS}} \right] \times 100 \quad (5)$$

Dónde:

PF: peso fresco

PT: peso turgente

PS: peso seco.

6.8 Potencial hídrico

El potencial hídrico de hojas se determinó con un medidor de potencial hídrico (WP4-T, Decagon® Devices, EUA), que opera bajo el principio del punto de rocío. De cada unidad experimental se seleccionaron dos plantas al azar, de las que se eligieron hojas sanas y completas. Las muestras se tomaron al medio día (12:00 h).

6.9 Rendimiento de biomasa fresca de verdolaga y romerito

Para determinar el rendimiento se pesó la biomasa aérea cosechada, para registrar el PF y PS de cada especie con una balanza digital (A&D Weighing®, EJ-6100, Japón). El rendimiento se determinó a partir de la biomasa aérea cosechada (g) por unidad de superficie (m²), utilizando la fórmula siguiente:

$$\text{Rendimiento comercial (kg m}^{-2}\text{)} = \frac{\text{BF}_c}{1000 \times 0.253} \quad (6)$$

Dónde:

BF_c: peso fresco o seco (g) de la biomasa aérea cosechada de cada tina de cultivo.

0.253: área superior (m²) de cada tina de cultivo.

6.10 Consumo y uso eficiente del agua

Para determinar el consumo de agua (CA) de cada especie, se realizaron mediciones semanales de la altura del agua contenida en cada tina de cultivo. Con estos datos se calculó el volumen de agua perdida a partir de las ecuaciones siguientes:

$$\text{Volumen de agua (L)} = \frac{\text{Área del fondo de la tina (cm}^2\text{)} \times \text{Altura del agua (cm)}}{1000} \quad (7)$$

$$\text{CA (L semana}^{-1}\text{)} = VA_1 - VA_2 \quad (8)$$

Dónde:

VA₁: Volumen de agua inicial (30 L de efluente acuícola).

VA₂: Volumen de agua al tiempo dos.

Al final del experimento, se midió el volumen de agua restante en cada tina con una probeta y se determinó el consumo total de agua de cada cultivo (L).

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se calculó como el peso fresco o seco de la producción entre el consumo total de agua a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{EUA (g L}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Producción (g)}}{\text{Consumo total de agua (L)}} \quad (9)$$

Dónde:

Producción: Biomasa aérea fresca (total) o biomasa aérea seca (total) en gramos.

6.11 Parámetros de calidad y contenido de nutrientes del medio de cultivo

Los parámetros de calidad y contenido de nutrientes del medio de cultivo se registraron semanalmente durante el experimento. El pH y la temperatura se midieron con un potenciómetro (Thermo Scientific® Orion Star A221, EUA); para la CE, SDT y la salinidad se utilizó un conductímetro portátil (Thermo Scientific® Orion Star A222, EUA); a su vez, la concentración de oxígeno disuelto se midió con un dispositivo portátil (Thermo Scientific® Orion Star A323, EUA). El contenido de Na⁺ se midió con un equipo portátil (LAQUAtwin Na11,

Horiba®, B-722, EUA). El pH se ajustó entre 5.5 y 6.5 añadiendo ácido sulfúrico (H_2SO_4) semanalmente durante el experimento.

La concentración de NO_3^- , NH_3 , NH_4^+ , K^+ , P, SO_4^{2-} , Mg^{2+} y Ca^{2+} se determinó a los 15 días después del trasplante y al final del experimento, utilizando para ello, un fotómetro multiparamétrico (Hanna® Instruments HI83300-01, EUA).

6.12 Contenido de nutrientes en la biomasa aérea

Las muestras secas y trituradas de la biomasa aérea de ambas especies se sometieron a un proceso de digestión ácida y se analizaron mediante espectroscopia de absorción atómica (GBC Modelo Avanta PM, Australia) para determinar la concentración de potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), hierro (Fe) y manganeso (Mn). La absorción de nutrientes se calculó multiplicando el peso seco de la biomasa aérea de cada cultivo con sus respectivas concentraciones de nutrientes (PS mg g^{-1}).

6.13 Análisis estadístico

Se aplicaron las pruebas de normalidad y homocedasticidad para verificar la distribución normal de los datos. Los datos se transformaron mediante logaritmo natural o raíz cuadrada cuando no se cumplió alguno de los supuestos. Para el análisis de longitud de tallo, peso fresco y seco de tallo y raíz, CRA, área foliar, TCR, clorofila a y b, rendimiento y EUA se realizó una prueba t de Student para determinar diferencias entre especies. Para las variables potencial hídrico y SPAD se realizó una prueba de suma de rangos de Mann-Whitney.

Para la variable consumo de agua, se realizó un análisis de varianza de una vía considerando como fuente de variación el tipo de cultivo (verdolaga, romerito y control), así como la prueba post hoc de Tukey HSD ($p=0.05$). Los datos de calidad y contenido de nutrientes en el medio de cultivo se analizaron a través del mismo método y las variables que no cumplieron el supuesto de normalidad se analizaron mediante una prueba de Kruskal-Wallis; cuando presentaron diferencias significativas se realizó una prueba post hoc de suma de rangos de Wilcoxon.

El contenido de nutrientes de la biomasa aérea se analizó mediante una prueba t de Student para determinar diferencias entre especies. Las pruebas estadísticas se realizaron con un nivel de significación de $\alpha = 0.05$. Los análisis se realizaron con el programa estadístico R (R Core Team, 2022).

7. RESULTADOS

7.1 Características morfométricas y fisiológicas de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (*O. niloticus*)

El peso fresco y seco de la biomasa aérea (hojas y tallos), así como el área foliar mostraron diferencias significativas entre especies. El resto de las variables no mostraron diferencias. Las plantas de verdolaga cultivadas con agua residual de tilapia presentaron los valores significativamente mayores de peso fresco ($t_{30}=5.60$, $p<0.001$) y peso seco de tallo ($t_{30}=2.32$, $p=0.027$), así como de área foliar ($t_{30}=5.48$, $p<0.001$; Tabla 3). El peso fresco de tallo y el área foliar fueron dos veces mayores en verdolaga que en romerito.

Las plantas de romerito no presentaron síntomas de deficiencia de nutrientes y las hojas eran suculentas. Las hojas de la verdolaga mantuvieron la turgencia y la mayoría mostraron apariencia óptima; sin embargo, en las últimas semanas de cultivo se observó clorosis en las hojas maduras, coloración morada en los bordes de las hojas y deformación foliar.

Tabla 3. Valores promedio de variables morfométricas cuantificadas en plantas de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=16).

Variables morfométricas	<i>P. oleracea</i>	<i>S. edulis</i>
Longitud tallo (cm)	14.54±1.89 ^a	14.98±2.41 ^a
Peso fresco tallo (g)	2.24±0.86 ^a	1.09±0.33 ^b
Peso fresco raíz (g)	0.41±0.30 ^a	0.38±0.18 ^a
Peso seco tallo (g)	0.18±0.07 ^a	0.13±0.05 ^b
Peso seco raíz (g)	0.03±0.03 ^a	0.04±0.01 ^a
Área foliar (cm ²)	17.33±6.51 ^a	8.24±2.96 ^b
TCR (g g ⁻¹ día ⁻¹)	0.13±0.03 ^a	0.14±0.02 ^a

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar. Valores promedio seguidos por letras diferentes en la misma fila son diferentes significativamente (t de Student, $p\leq 0.05$). TCR= Tasa de crecimiento relativo.

El potencial hídrico no mostró diferencias significativas entre especies. El índice de clorofila (SPAD) fue significativamente mayor en plantas de verdolaga comparado con el romerito ($W=2304$, $p<0.001$), mientras que, el romerito mostró los valores más altos para el contenido de

clorofila "a" ($t_{30}=-8.53$, $p<0.001$), clorofila "b" ($t_{30}=-6.37$, $p<0.001$) y clorofila total ($t_{30}=-9.28$, $p<0.001$). El contenido relativo de agua (CRA) fue significativamente mayor en plantas de verdolaga ($t_{22}=-5.66$, $p<0.001$) que en romerito (**Tabla 4**).

Tabla 4. Valores promedio de variables fisiológicas cuantificadas en plantas de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=16).

Variables fisiológicas	<i>P. oleracea</i>	<i>S. edulis</i>
Clorofila a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	7.20 \pm 2.81 ^b	17.99 \pm 4.22 ^a
Clorofila b ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	2.20 \pm 1.42 ^b	7.21 \pm 2.98 ^a
Clorofila total ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	9.40 \pm 3.05 ^b	25.20 \pm 6.96 ^a
Índice de clorofila (SPAD)	29.18 \pm 5.20 ^a	7.72 \pm 2.10 ^b
CRA (%)	63.70 \pm 6.06 ^a	55.79 \pm 6.73 ^b
Potencial hídrico (MPa)	-8.07 \pm 4.05 ^a	-4.67 \pm 0.99 ^a

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar. Valores promedio seguidos por letras diferentes en la misma fila son diferentes significativamente (t de Student, $p\leq 0.05$).

7.2 Rendimiento de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (*O. niloticus*)

La biomasa fresca cosechada (tallos y hojas) de verdolaga fue de 319.65 \pm 42.46 g tina⁻¹ con un rendimiento promedio de 1.26 \pm 0.17 kg m⁻². En el caso del romerito la biomasa fresca promedio fue de 178.48 \pm 12.48 g tina⁻¹ que representa un rendimiento de 0.71 \pm 0.05 kg m⁻² (Fig. 1).

A su vez, la biomasa seca en verdolaga fue 28.05 \pm 3.90 g tina⁻¹, que corresponde a un rendimiento promedio de 0.11 \pm 0.02 kg m⁻² de biomasa seca. En romerito, la biomasa seca cosechada fue 21.18 \pm 0.91 g tina⁻¹, equivalente a un rendimiento de 0.08 \pm 0.004 kg m⁻² (Fig. 2).

El rendimiento fue significativamente mayor en verdolaga ($t_{3,5}=6.37$, $p=0.004$; $t_{3,3}=3.43$, $p=0.035$; Fig. 3).

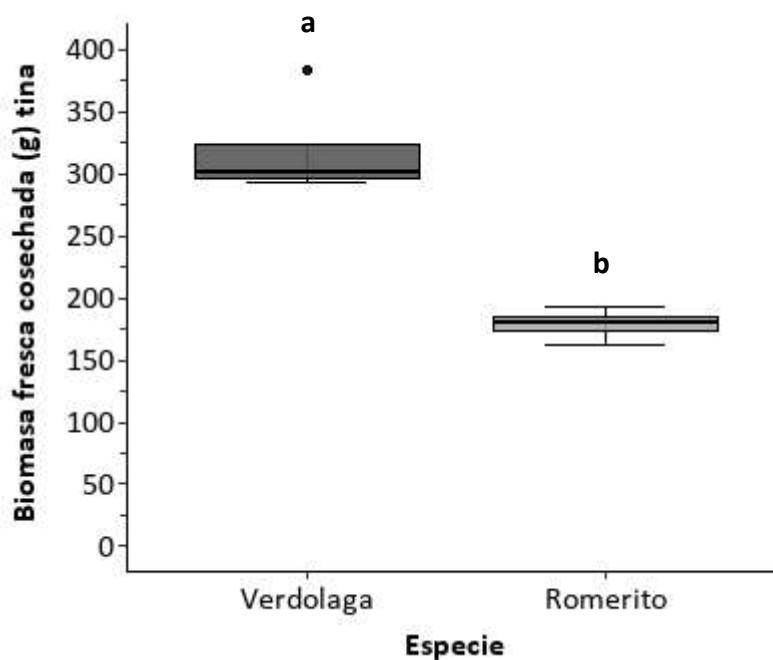


Figura 1. Biomasa fresca promedio (\pm DE) de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=4). Se utilizaron 200 plantas para determinar el rendimiento. Valores promedio con literales diferentes indican diferencias significativas (t de Student, $p \leq 0.05$).

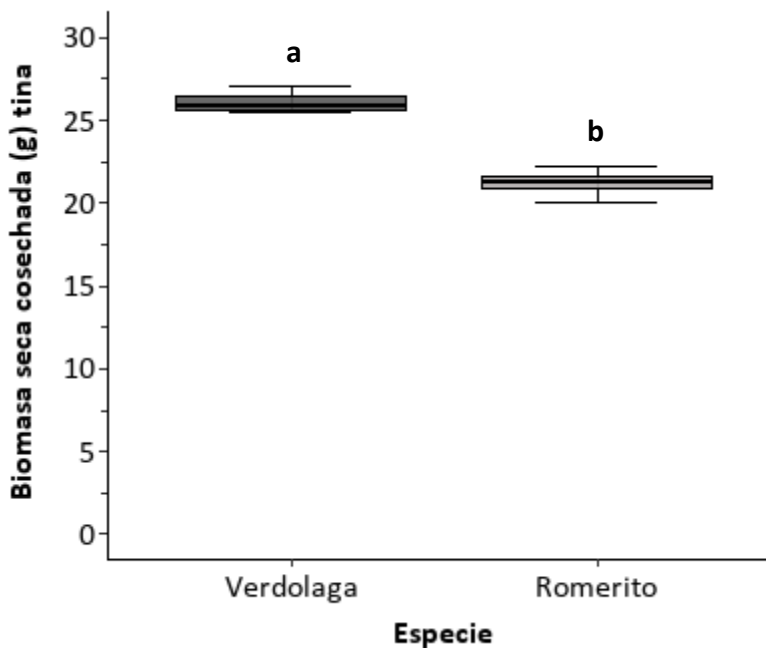


Figura 2. Biomasa seca promedio (\pm DE) de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de de tilapia (*O. niloticus*) (n=4). Se utilizaron 200 plantas para determinar el rendimiento. Valores promedio con literales diferentes indican diferencias significativas (t de Student, $p \leq 0.05$).

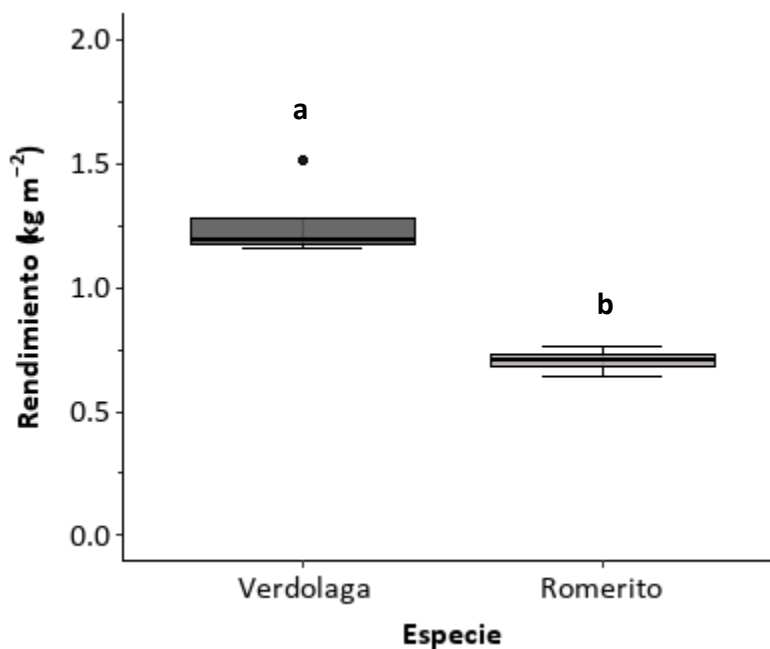


Figura 3. Rendimiento promedio (\pm DE) de biomasa fresca de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=4). Se utilizaron 200 plantas para determinar el rendimiento. Valores promedio con literales diferentes indican diferencias significativas (t de Student, $p \leq 0.05$).

7.3 Consumo y eficiencia en el uso del agua de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (*O. niloticus*)

El consumo de agua por efluente en las dos especies y el control fue menor en la segunda semana del experimento. El volumen de agua disponible en el tratamiento control no mostró diferencias significativas entre fechas ($F_{3,12}=3.07$, $p=0.069$). Por su parte, el consumo de agua en verdolaga fue significativamente mayor en la primera y tercera semana de cultivo ($F_{3,12}=35.58$, $p < 0.001$), mientras que en romerito el consumo de agua disminuyó en la semana dos y alcanzó un máximo durante la semana tres de cultivo ($F_{3,12}=69.7$, $p < 0.001$). El volumen total de agua consumida por tratamiento mostró diferencias significativas ($F_{2,9}=26.04$, $p < 0.001$), siendo mayor el consumo de agua en romerito y menor en verdolaga (**Tabla 5**).

Tabla 5. Valores promedio del consumo total de agua de *P. oleracea* y *S. edulis* y agua perdida en el tratamiento control durante las cuatro semanas de producción hidropónica con agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=4).

Especies	Consumo de agua (L)
<i>S. edulis</i>	27.34±0.74 ^a
<i>P. oleracea</i>	22.71±0.59 ^c
Tratamiento Control	25.41±1.26 ^b

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar. Valores promedio seguidos por letras diferentes en la misma columna son diferentes significativamente (t de Student, $p \leq 0.05$).

El uso de agua en las plantas de verdolaga, romerito y el volumen disponible en el tratamiento control fue similar durante las cuatro semanas de producción (Fig. 4). En las primeras dos semanas no hubo diferencias en el consumo de agua entre especies o el tratamiento control ($F_{2,9}=0.36$, $p=0.708$; $F_{2,9}=0.72$, $p=0.511$). En la semana tres, el consumo de agua fue significativamente mayor en plantas de romerito ($H=7.48$, $gl=2$, $p=0.024$), mientras que, en la última semana de cultivo, las plantas de romerito mostraron los valores más altos de agua perdida y las de verdolaga los valores menores ($F_{2,9}=45.71$, $p<0.001$).

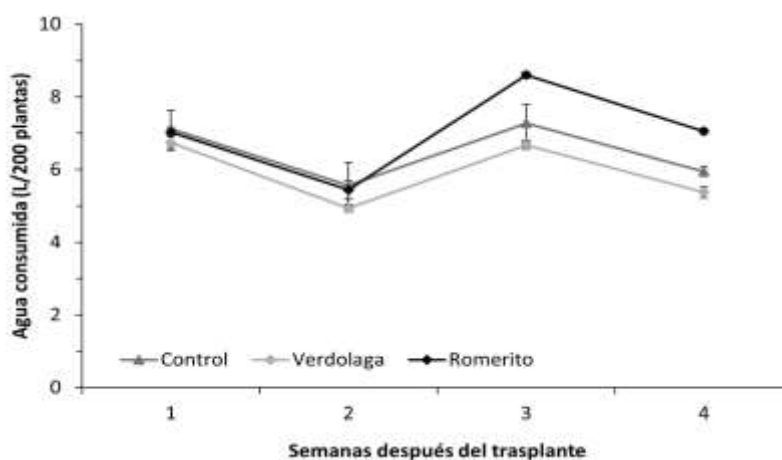


Figura 4. Consumo de agua promedio (\pm DE) de *P. oleracea* y *S. edulis* y agua perdida en el tratamiento control durante las cuatro semanas utilizando el efluente de agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=4).

La eficiencia en el uso del agua (EUA) fue significativamente mayor en plantas de verdolaga ($t_6=8.54$, $p<0.001$) en comparación con las de romerito (**Tabla 6**) con una productividad de agua de 0.014 ± 0.002 kg de biomasa fresca L^{-1} de efluente consumido comparada con los 0.007 ± 0.0005 kg L^{-1} del romerito. Respecto a la biomasa seca, la EUA mostró la misma respuesta ($t_6=5.30$, $p=0.002$).

Tabla 6. Eficiencia en el uso de agua de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=4).

EUA	<i>P. oleracea</i>	<i>S. edulis</i>
EUA (g biomasa fresca L^{-1} de agua consumida)	14.09 ± 1.02^a	6.53 ± 0.48^b
EUA (g biomasa seca L^{-1} de agua consumida)	1.24 ± 0.19^a	0.78 ± 0.04^b

Los valores representan el promedio \pm la desviación estándar. Valores promedio seguidos por letras diferentes en la misma fila son diferentes significativamente (t de Student, $p\leq 0.05$).

7.4 Parámetros de calidad y concentración de nutrientes en el medio de cultivo de *P. oleracea* y *S. edulis*

7.4.1 Parámetros de calidad del medio de cultivo

La temperatura se mantuvo constante durante el periodo de cultivo, oscilando entre 14.1 y 21.1 °C (Fig. 5A), mostrando una respuesta similar en todos los efluentes. En relación con las fechas de muestreo, en el medio de cultivo de verdolaga no se encontraron diferencias significativas entre fechas ($F_{4,15}=1.68$, $p=0.207$), mientras que, en romerito, la temperatura fue significativamente menor en la semana tres de cultivo ($F_{4,15}=8.82$, $p<0.001$), en tanto que en el tratamiento control se registró la temperatura significativamente mayor en la primera semana y la menor en la semana tres ($F_{4,15}=3.8$, $p=0.025$).

La concentración de oxígeno disuelto se mantuvo entre 9.18 y 11.39 $mg L^{-1}$ (Fig. 5B) y no se presentaron diferencias entre efluentes durante el periodo evaluado. Las diferencias a través del tiempo mostraron que los valores mayores se presentaron en la semana tres en todos los casos (control $F_{4,15}=10.67$, $p<0.001$; romerito $H=9.77$, $gl=4$, $p=0.044$), mientras que en verdolaga el oxígeno disuelto disminuyó en la semana dos ($F_{4,15}=3.43$, $p=0.035$).

El valor del pH al inicio del experimento fue de 8.7 y se ajustó entre 5.5 y 6.5 mediante la adición de H_2SO_4 . En las primeras semanas, el pH osciló entre 6 y 7 por lo que se realizó el ajuste correspondiente; a su vez, en las últimas tres semanas presentó valores por encima de 5.4 en todos los casos (Fig. 5C).

La CE, los SDT y la salinidad al inicio del experimento fueron 3.154 mS cm^{-1} , 1.546 ppt y 1.631 PSU, respectivamente. Dichas variables incrementaron a través del tiempo en los tres efluentes; el análisis realizado mostró diferencias entre fechas (Tukey $p \leq 0.05$). El romerito mostró los valores promedio mayores al final del periodo de cultivo con $8.31 \pm 0.88 \text{ mS cm}^{-1}$, $4.07 \pm 0.43 \text{ ppt}$ y $4.60 \pm 0.51 \text{ PSU}$.

El romerito presentó los valores mayores de CE en las últimas tres semanas de cultivo (Fig. 5D). Las diferencias fueron significativas entre romerito y verdolaga en la semana tres ($F_{2,9}=4.43$, $p=0.045$), mientras que, la verdolaga y el tratamiento control presentaron los valores menores en la semana cuatro ($F_{2,9}=14.33$, $p=0.001$) y cinco ($H=9.26$, $gl=2$, $p=0.009$).

Los SDT mostraron diferencias significativas entre verdolaga y romerito en la semana tres de cultivo ($F_{2,9}=4.44$, $p=0.045$). El romerito mostró los valores mayores en la semana cuatro ($F_{2,9}=14.37$, $p=0.001$) y al final del experimento las diferencias fueron significativas entre especies y el tratamiento control ($H=9.26$, $gl=2$, $p=0.009$, Fig. 5E). La salinidad fue mayor en el medio de cultivo de romerito para las semanas cuatro ($F_{2,9}=14.37$, $p=0.001$) y cinco ($H=9.26$, $gl=2$, $p=0.009$) de cultivo (Fig. 5F).

El contenido de Na^+ en el efluente se incrementó a través del tiempo en todos los casos. En la semana cinco de cultivo, se presentaron valores de 600 a 1000 ppm (Fig. 6). El contenido de Na fue significativamente mayor en el romerito respecto a la verdolaga en la semana cuatro ($H=6.78$, $gl=2$, $p=0.034$). El romerito mostró los valores promedio de Na mayores al final del periodo de cultivo ($H=8.14$, $gl=2$, $p=0.017$) con $902.50 \pm 84.21 \text{ ppm}$.

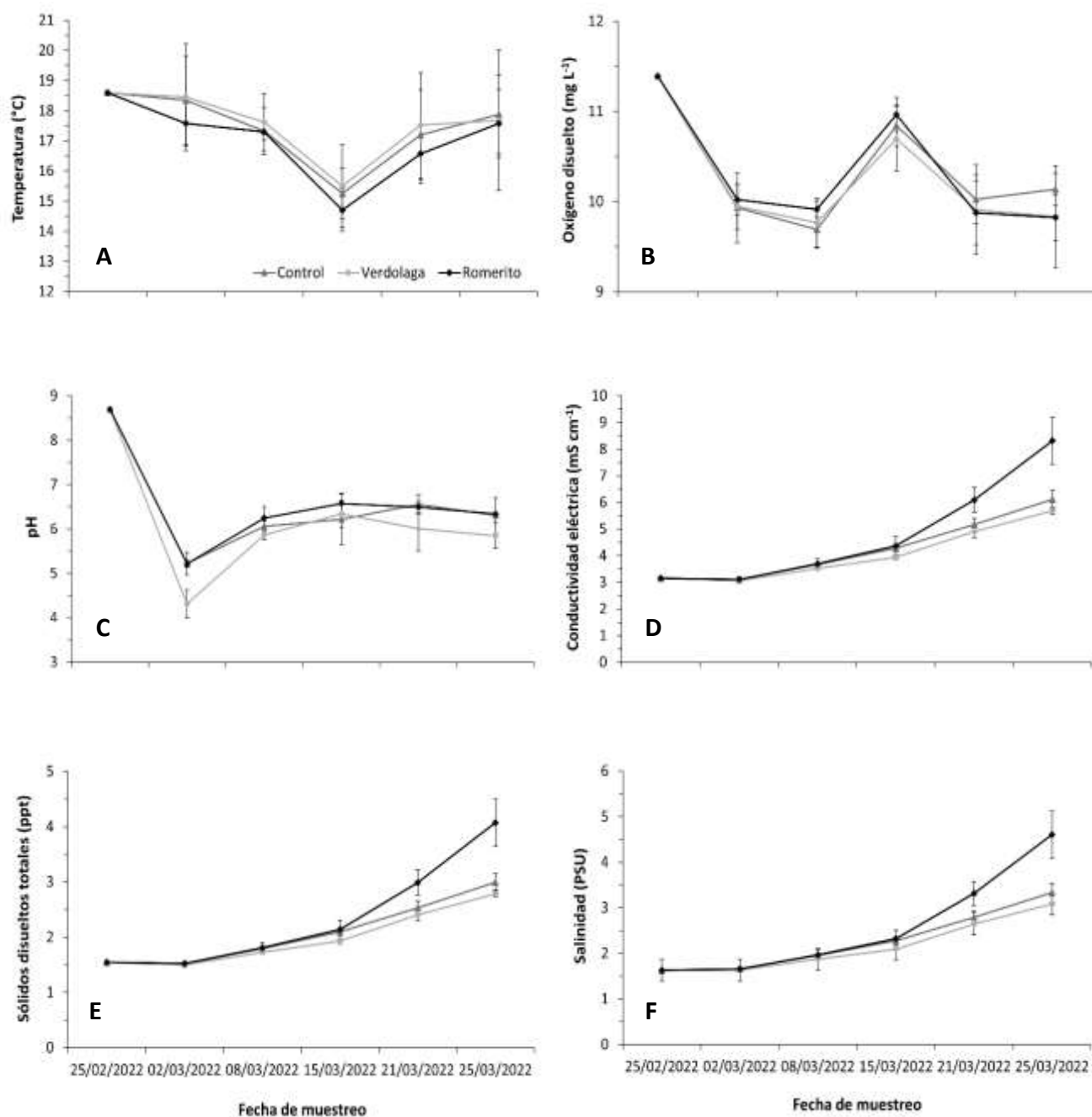


Figura 5. Valores promedio (\pm DE) de A) temperatura, B) oxígeno disuelto, C) pH, D) conductividad eléctrica, E) sólidos disueltos totales y F) salinidad en el medio de cultivo de *P. oleracea* y *S. edulis* y el tratamiento control a través del tiempo ($n=4$).

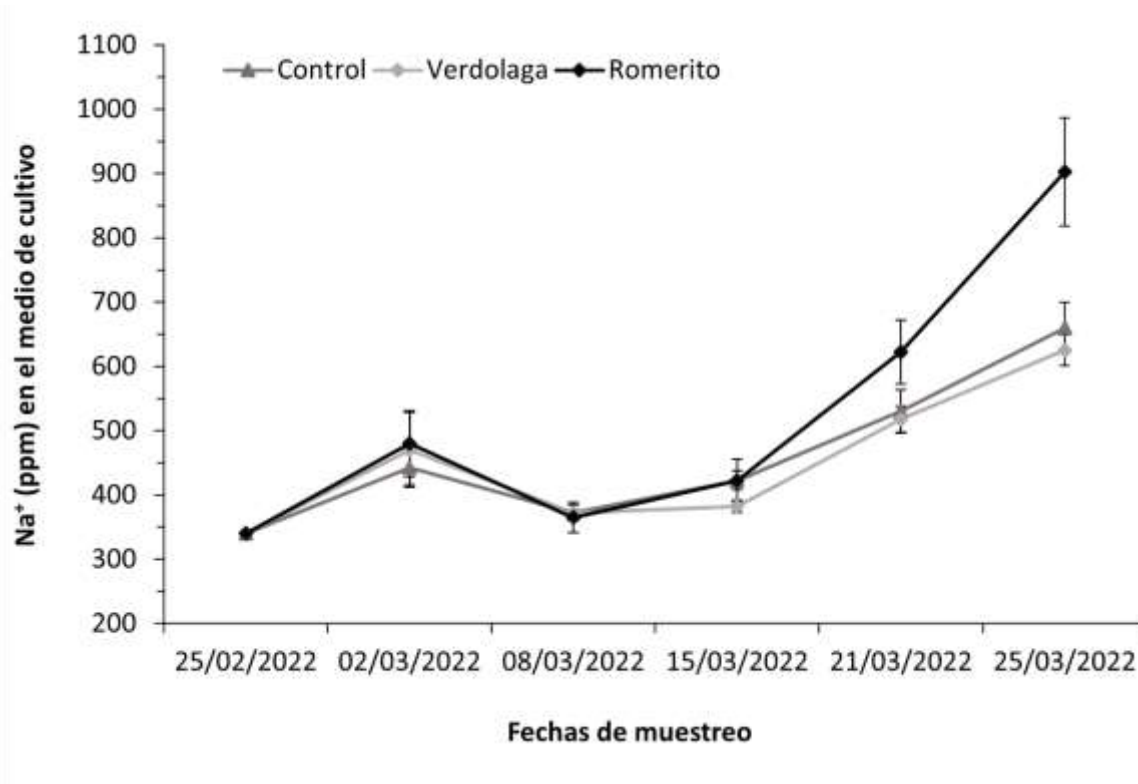


Figura 6. Valores promedio (\pm DE) del contenido de sodio en el medio de cultivo de *P. oleracea*, *S. edulis* y el tratamiento control a través del tiempo (n=4).

7.4.2 Contenido de nutrientes en el medio de cultivo

La concentración de nutrientes en el medio de cultivo mostró diferencias a través del tiempo entre tratamientos (Fig. 7). El contenido de nitratos (NO_3^-) no mostró diferencias entre tratamientos a los 15 días de cultivo ($F_{2,9}=2.85$, $p=0.11$). Además, los nitratos no se detectaron en el medio de cultivo de verdolaga y romerito al final del experimento. En el tratamiento control, la concentración de NO_3^- disminuyó en el tiempo ($t_6=0.11$, $p=0.919$), sin embargo, las diferencias fueron no significativas (Fig. 7A).

La concentración de NH_3 mostró diferencias no significativas entre tratamientos ($F_{2,9}=0.07$, $p=0.931$) en la primera evaluación (Fig. 7B). En la etapa final del experimento, el romerito presentó los valores promedio mayores ($F_{2,9}=14.51$, $p<0.001$) con incrementos al final del experimento en esta misma especie ($t_6=-3.18$, $p=0.019$), mientras que para la verdolaga ($t_6=-$

1.86, $p=0.113$) y el control ($t_6=-2.07$, $p=0.084$) no se encontraron diferencias entre fechas evaluadas.

El contenido de NH_4^+ no presentó diferencias significativas entre tratamientos en la primera evaluación ($F_{2,9}=0.08$, $p=0.927$). Al final del experimento el romerito presentó los valores promedio mayores (Welch $F_{2,9}=8.59$, $p=0.019$) respecto a la verdolaga y el control. El NH_4^+ se incrementó en romerito ($t_6=-3.17$, $p=0.019$) mientras que en verdolaga ($t_6=-1.89$, $p=0.108$) y el tratamiento control ($t_6=-2.10$, $p=0.081$) se mantuvo igual respecto a la primera evaluación (Fig. 7C).

El contenido de K^+ fue significativamente menor en la verdolaga respecto al romerito y al tratamiento control para ambas fechas evaluadas ($H=8.13$, $gl=2$, $p=0.017$ y $H=9.43$, $gl=2$, $p=0.009$; Fig. 7D). El K^+ incrementó al final del experimento en el tratamiento control ($t_6=-8.49$, $p<0.001$) y en romerito ($t_6=-2.75$, $p=0.033$), mientras que en verdolaga disminuyó ($t_6=-1.07$, $p=0.325$), sin embargo, las diferencias fueron no significativas.

El contenido de P disminuyó a lo largo del periodo de cultivo (Fig. 7E) y en la primera evaluación no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($F_{2,9}=1.60$, $p=0.255$). Al final del experimento, el P disminuyó (romerito y control $W=16$, $p=0.029$; verdolaga $t_6=5.85$, $p=0.001$), sin embargo, el tratamiento control presentó los valores promedio mayores ($F_{2,9}=20.15$, $p<0.001$).

El contenido de Mg^{2+} en la primera fecha no mostró diferencias entre tratamientos ($F_{2,9}=2.28$, $p=0.158$; Fig. 7F). Dicho catión aumentó en todos los tratamientos al final del experimento (romerito $t_6=-9.14$, $p<0.001$; verdolaga $t_6=-8.72$, $p<0.001$; y control $t_{(6)}=-8.31$ $p<0.001$). El Mg^{2+} mostró los valores promedio mayores en romerito ($F_{2,9}=17.1$, $p<0.001$).

El contenido de Ca^{2+} fue mayor en la primera fecha evaluada en la verdolaga y en el control ($F_{2,9}=11.36$ $p=0.003$; Fig. 7G), mientras que en la segunda fecha la verdolaga mostró valores mayores comparada con el control ($F_{2,9}=5.99$, $p=0.022$). Al final del experimento, el Ca^{2+} incrementó en el romerito (Welch $t_{3,27}=-3.15$, $p=0.046$) y disminuyó en el control ($t_6=3.49$, $p=0.013$) respecto a la primera evaluación. La verdolaga no mostró diferencias significativas ($t_6=1.45$, $p=0.198$) comparada con romerito y el control.

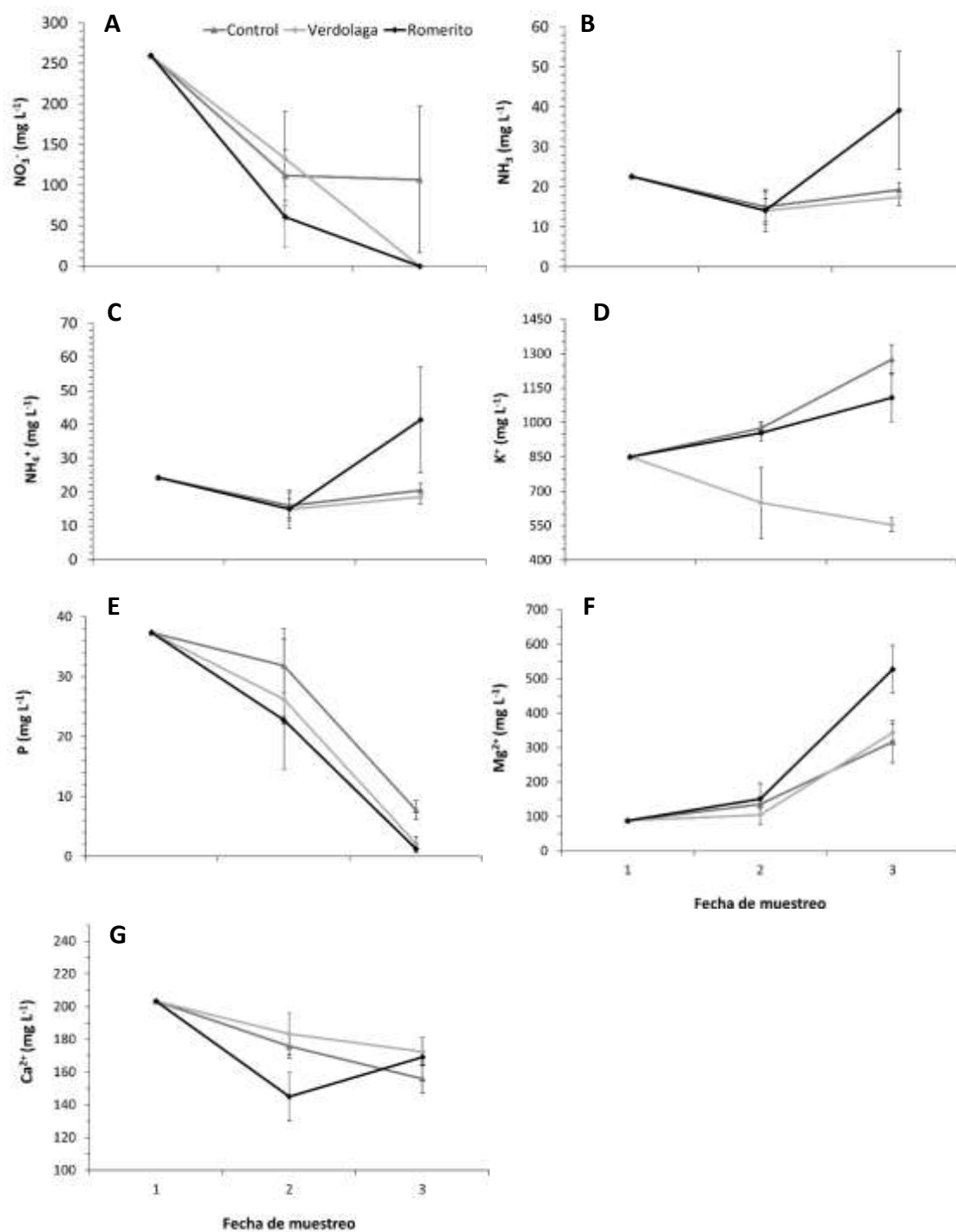


Figura 7. Valores promedio (\pm DE) del contenido de A) nitratos, B) amoníaco, C) amonio, D) potasio, E) fósforo, F) magnesio y G) calcio en el medio de cultivo de *P. oleracea*, *S. edulis* y el tratamiento control al inicio del experimento, a los 15 días y al final (n=4).

7.5 Concentración de nutrientes en la biomasa aérea de *P. oleracea* y *S. edulis*

El contenido de Ca^{2+} ($t_{5,9}=0.01$, $p=0.987$) y $\text{Fe}^{2+,3+}$ ($t_{5,8}=0.75$, $p=0.481$) en la biomasa aérea no mostró diferencias significativas entre especies (Tabla 7). La verdolaga presentó los valores promedio mayores de K^+ ($t_{5,2}=7.90$, $p<0.001$) y Mn^{2+} ($t_{5,5}=6.26$, $p = 0.001$), mientras que, el romerito presentó el contenido mayor de Mg^{2+} ($t_{5,8}=-4.38$, $p=0.004$) y Na^+ ($W=0$, $p=0.02$). La concentración de estos nutrientes en plantas de verdolaga fue en el orden siguiente $\text{K}^+>\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{Fe}^{2+,3+}>\text{Mn}^{2+}$ y en plantas de romerito presentó el orden $\text{Na}^+>\text{K}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{Fe}^{2+,3+}>\text{Mn}^{2+}$.

Tabla 7. Valores promedio del contenido de potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro y manganeso en la biomasa aérea de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en agua residual de tilapia (*O. niloticus*) (n=4).

Nutriente (mg kg ⁻¹)	<i>P. oleracea</i>	<i>S. edulis</i>
Potasio (K ⁺)	46,465.92±6050.51 ^a	17,742.59±4031.32 ^b
Calcio (Ca ²⁺)	9,722.79± 2200.37 ^a	9,697.09±2213.23 ^a
Magnesio (Mg ²⁺)	9,881.13±1826.73 ^b	15,158.98±1571.67 ^a
Sodio (Na ⁺)	12,371.07±2017.97 ^b	44,868.97±2548.22 ^a
Hierro (Fe ^{2+,3+})	310.92±92.46 ^a	256.58±111.25 ^a
Manganeso (Mn ²⁺)	116.64±11.07 ^a	58.24±15 ^b

Los valores representan el promedio ± la desviación estándar. Valores promedio seguidos por letras diferentes en la misma fila son diferentes significativamente (t de Student, $p\leq 0.05$).

8. DISCUSIÓN

8.1 Características morfológicas y fisiológicas de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (*O. niloticus*)

El efluente proveniente del cultivo de tilapia provee los nutrientes necesarios para el crecimiento de plantas de verdolaga y romerito, las cuales crecen sin la adición de nutrientes en el medio de cultivo; sin embargo, se observaron algunos síntomas de deficiencia nutricional. Las plantas de verdolaga presentaron clorosis en las hojas maduras, deformación foliar y coloración morada. Por el contrario, el romerito no mostró síntomas de deficiencia de nutrientes. Durante el período de cultivo, no hubo mortalidad de plantas en ambas especies. En estudios previos donde se utilizó el efluente de tilapia como fuente de nutrientes, no se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad de ningún mineral, tal como lo reporta Rosales-Nieblas (2022), quien no observó síntomas visibles en plantas de verdolaga y epazote cultivadas hidropónicamente con tratamientos sin adición de micronutrientes. Asimismo, Effendi y colaboradores (2017), en plantas de lechuga romana cultivada en un sistema de recirculación acuícola no observaron síntomas de deficiencia. Los valores promedio de longitud de tallo registrados en el presente estudio fueron menores al tamaño comercial (aproximadamente 40 cm de alto) y menores a lo reportado en otros estudios. En el caso de la verdolaga, dicha variable fue menor a los 37.75 cm reportados por Rosales-Nieblas (2022) y a los 20 ± 0.10 cm reportados por Omeir y colaboradores (2020) utilizando efluente acuícola como fuente de nutrientes. En el caso del romerito, no se encontraron estudios que reporten el efecto del uso de efluentes acuícolas en el crecimiento.

Los valores de PF y PS de la biomasa aérea de verdolaga y romerito fueron menores a los reportados en otros estudios. En el caso de la verdolaga, Ngosong y colaboradores (2013) reportaron valores de 11.22 ± 4.53 g de PS para plantas cultivadas hidropónicamente con una solución Hoagland de concentración media, con evaluación a los 35 días de cultivo. En contraste, Omeir y colaboradores (2020) obtuvieron 66.6 ± 0.65 g de PF y 7.6 ± 0.02 g de PS en plantas irrigadas con efluente acuícola después de 60 días de establecimiento. Por su parte, Rosales-Nieblas (2022) reportó valores de 174.47 g de PF y 7.1 g de PS para verdolaga en sistema hidropónico con efluente de tilapia, durante un ciclo de 30 días. Para el género *Suaeda*, Brown y colaboradores (1999) reportaron valores de 66.79 ± 10.23 g de PS de biomasa aérea en plantas de *Suaeda esteroa* regadas con efluente de tilapia, después de cultivarlas en lisímetros

durante 86 días. Por su parte, Kong y Zheng (2015) reportaron valores de 22.7 ± 3.9 g de PF y 2.33 ± 0.35 g de PS de plantas de *Suaeda glauca* cultivadas hidropónicamente con solución nutritiva moderadamente salina durante cuatro semanas. La evaluación de la tasa de crecimiento relativo (TCR) mostró que la acumulación de biomasa seca fue similar entre verdolaga y romerito, lo cual coincide con los valores de longitud de tallo y biomasa de raíz. Este resultado indica que no hubo una respuesta diferencial en el crecimiento entre especies al utilizar el efluente de tilapia como fuente de nutrientes. No obstante, se observaron diferencias en la biomasa aérea, la cual fue dos veces más elevada en plantas de verdolaga que en romerito, debido a un área foliar mayor (**Tabla 4**). Los valores superiores de biomasa aérea de *P. oleracea* respecto a *S. edulis* no se atribuyen a una tasa de crecimiento mayor, sino que podrían atribuirse a un vigor inicial superior. Por otra parte, Poorter y Nagel (2000) mencionaron que las plantas presentan variaciones en los patrones de asignación de biomasa para el crecimiento, ya sea a la parte aérea o subterránea como respuesta a cambios en los factores ambientales. Además, que en plantas cultivadas a distintos niveles de nutrientes, la asignación de biomasa a las hojas es el factor que más influye en la tasa de crecimiento ante un suministro limitado de nutrientes.

Aun cuando el romerito presentó un contenido de clorofila mayor respecto a la verdolaga, sin embargo, presentó el contenido relativo de clorofila (SPAD) menor, que se atribuye a una coloración verde menos intensa como resultado de la excreción de sales a través de gutación estomática o por difusión cuticular (Labidi *et al.*, 2010), lo cual produce un reflejo menor de la luz verde. Dicha respuesta se le atribuye a variaciones en las lecturas ocasionadas por diferencias en el grosor de la hoja, la presencia o ausencia de venas y/o presencia de otros pigmentos (Palta, 1990). Asimismo, estas diferencias pueden obedecer a una concentración mayor de clorofila por área foliar en plantas de romerito debido a una asignación menor de biomasa a las hojas. En plantas cultivadas con un suministro reducido de nutrientes se presenta una disminución en la tasa fotosintética por unidad de masa foliar; sin embargo, el crecimiento es más afectado que la fotosíntesis (Poorter y Nagel, 2000). En verdolaga, los valores de SPAD fueron similares a los reportados en otros estudios (Lara *et al.*, 2011; Ngosong *et al.*, 2013; Rosales-Nieblas, 2022) y se ha demostrado que los valores de SPAD (Ngosong *et al.*, 2013), así como el contenido de clorofila, no son afectados por la salinidad (Karakaş *et al.*, 2017). El

crecimiento y la acumulación de biomasa en plantas de verdolaga se ha evaluado en condiciones de salinidad, reportando que esta especie se desarrolla adecuadamente en condiciones no salinas a moderadamente salinas, con CE hasta de 6.8 dS m^{-1} (Shannon y Grieve, 1999; Teixeira y Carvalho, 2009; Ngosong *et al.*, 2013), sin disminuir su rendimiento (Kiliç *et al.*, 2008). Para el género *Suaeda* se ha reportado que *S. salsa* y *S. glauca* tienen crecimiento óptimo a salinidad moderada, hasta 200 mM de NaCl (21 dS m^{-1} ; Song *et al.*, 2009; Kong y Zheng, 2015). Por lo anterior, se asume que las diferencias en el crecimiento respecto a otros estudios se deben principalmente a un suministro limitado de nutrientes y no al aumento de salinidad en el medio de cultivo.

Los cambios en la asignación de biomasa en las plantas son más importantes en el caso de un suministro reducido de nutrientes respecto a factores como la disponibilidad de luz, agua y CO_2 (Poorter y Nagel, 2000). En plantas de verdolaga cultivadas sin N se han reportado síntomas de estrés, incluyendo menor tamaño y número de hojas, comparadas con aquellas con suministro de N (Fontana *et al.*, 2006). En este sentido, la disminución de las concentraciones de nitrato y P en el medio de cultivo (Fig. 7Figura 7A), un crecimiento menor de plantas de verdolaga y de romerito, así como la presencia de síntomas de deficiencia nutricional, sugieren que las plantas estaban limitadas en dichos nutrientes (Geilfus, 2019). Sleimi y Abdelly (2002) indican que el N, y en menor medida el P, fueron los nutrientes que más limitaron el crecimiento de *Suaeda fruticosa* y *Spartina alterniflora* cultivadas con agua de mar (diluida al 50 %), porque al evaluar la producción de biomasa utilizando enmiendas de N y P, la misma fue similar a la de plantas cultivadas en una solución nutritiva completa. Las citadas especies mostraron tasas de crecimiento mayores cuando se añadió N, y en menor grado P al agua de mar. Por lo anterior, se asume que la disminución en el crecimiento de ambas especies se atribuye a un abatimiento en la concentración de nutrientes en el medio de cultivo a través del tiempo.

En esta investigación se encontró una respuesta diferencial en el desarrollo morfométrico de verdolaga y romerito cultivadas en sistema hidropónico con agua residual de tilapia (*Oreochromis niloticus*), el cual se atribuye a una disponibilidad menor de nutrientes.

8.2 Rendimiento de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (*O. niloticus*)

El rendimiento (kg m^{-2}) de *P. oleracea* al final de las cuatro semanas de cultivo fue mayor que el de *S. edulis*, debido a la respuesta diferencial en el desarrollo morfométrico de dichas especies (Tabla 3). Sin embargo, el rendimiento de verdolaga fue menor al reportado en sistemas de cultivo tradicional, lo cual fue informado por Petropoulos y colaboradores (2015), quienes reportaron valores entre 2.0 y 2.5 kg m^{-2} de biomasa fresca para dos genotipos comerciales de verdolaga sin la aplicación de fertilizantes. Por su parte, Alu'datt y colaboradores (2019) reportaron valores de biomasa fresca de 0.26 y 2.21 kg m^{-2} en la primera y segunda cosecha de esta especie cultivada en peat moss-perlita (2:1) utilizando sistema de riego por goteo con solución nutritiva, mientras que en sistema hidropónico de raíz flotante utilizando diferentes sustratos con solución nutritiva, Cros y colaboradores (2007b) reportaron rendimientos entre 0.534 y 2.24 kg m^{-2} . Para romerito no se encontraron estudios que reporten la respuesta de la producción de biomasa utilizando sistema de cultivo hidropónico con agua residual de acuicultura, incluyendo tilapia. En verdolaga, al comparar los valores de biomasa fresca cosechada con los reportados por Rosales-Nieblas (2022), la biomasa fresca por planta fue 76 % mayor que en este estudio utilizando el mismo sistema de producción con efluente de tilapia y sin la adición de micronutrientes, mientras que la investigación de Omeir y colaboradores (2020) reportó un 28 % mayor utilizando efluente acuícola para riego. Aún cuando se observan diferencias en los datos de biomasa aérea reportados por estudios previos, el rendimiento observado se encuentra entre los valores reportados en sistemas de cultivo que utilizan solución nutritiva como fuente de nutrientes. Toda vez que verdolaga se adapta bien a sistemas de cultivo de raíz flotante (Cros *et al.*, 2007; Rosales-Nieblas, 2022), es factible alcanzar un rendimiento mayor en un período corto de tiempo (Cros *et al.*, 2007), en virtud de que el efluente acuícola suministra los nutrientes necesarios para su crecimiento (Omeir *et al.*, 2020).

Brown y Glenn (1999) reportaron rendimientos entre 384.9 y 693.7 g de biomasa seca por lisímetro (1.02 m^2) en plantas de *S. esteroa* regadas con efluente acuícola de tilapia diferentes volúmenes de riego. Por su parte, Kong y Zheng (2015) obtuvieron rendimientos de 4.02 a 5.65 kg m^{-2} de biomasa fresca de *S. glauca* cultivada en sistema hidropónico a diferentes niveles de salinidad; en ambos casos, tales valores son mayores a los obtenidos en este estudio para *S.*

edulis. En general, el rendimiento en ambas especies se redujo debido al periodo corto del ciclo de cultivo y a diferencias en la disponibilidad de nutrientes, toda vez que en estudios previos se suministraron nutrientes de forma constante a través de riegos regulares o del recambio de la solución nutritiva. Por otro lado, la disminución en el rendimiento se atribuye a diferencias en la disponibilidad de nutrientes como resultado de la densidad de siembra. Un número menor de plantas permite un incremento en la acumulación de nutrientes, mientras que una densidad mayor de plantas aumenta la absorción de nutrientes y mejora la calidad del agua, aunque también conduce a tasas de crecimiento más lentas y una producción menor (Buzby y Lin, 2014). Maludin y colaboradores (2020) evaluaron el crecimiento y rendimiento de Pak Choy cultivado a diferentes densidades de siembra y concentración de nutrientes en sistema hidropónico. Los tratamientos con densidad de plantas menor presentaron un crecimiento y rendimiento mayor en comparación con la densidad mayormás alta a la misma concentración de nutrientes (Maludin *et al.*, 2020), a diferencia de lo reportado por Boxman y colaboradores (2017) en *Sesuvium portulacastrum* (verdolaga de playa) y *Batis marítima* (saladilla) cultivadas hidropónicamente en un sistema acuapónico marino, donde la densidad de plantas no afectó significativamente la calidad del agua o el crecimiento de las plantas. La densidad de siembra determina la productividad de un cultivo, porque un rendimiento mayor puede ser resultado de un número mayor de plantas en una determinada área (Maludin *et al.*, 2020). Lo anterior coincide con los datos de rendimiento obtenido para la verdolaga, la cual presentó valores de biomasa aérea menores a los reportados en otros estudios, pero una densidad de plantas mayor compensó el peso fresco relativamente bajo producido por planta (Wiangsamut y Koolpluksee, 2020), por lo cual los valores de rendimiento fueron mayores; no así en el romerito que mostró un rendimiento menor.

Las plantas expuestas a condiciones de estrés presentan patrones de respuesta o desarrollo ecológico diferentes y complejos, que se manifiestan a través de cambios en el vigor y el desarrollo vegetal (Bradshaw, 2006; Bouain *et al.*, 2019). Debido a que las plantas no tienen movilidad para evitar condiciones estresantes, deben promover o adaptarse mediante cambios fenotípicos que minimicen el estrés (Bradshaw, 2006). Las fluctuaciones en la disponibilidad de macro y micronutrientes, así como la interacción entre ellos, ejercen un claro efecto en el crecimiento y la homeostasis iónica de las plantas (Bouain *et al.*, 2019).

Las plantas demandan N y P en cantidades altas para su crecimiento y desarrollo y la deficiencia de uno de ellos limita el rendimiento en las especies cultivadas (Bouain *et al.*, 2019). Estudios previos reportan que la verdolaga es poco sensible al aumento de N en la solución nutritiva en términos de producción de biomasa (Fontana *et al.*, 2006; Nicola *et al.*, 2007). Sin embargo, la composición de la solución nutritiva ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$) influye en la calidad y el rendimiento de esta especie en cultivo sin suelo, donde el N suministrado en forma de nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) incrementa el crecimiento de las plantas, en comparación con los tratamientos suministrados solo con NH_4^+ . El peso fresco y seco de tallos y hojas, el área foliar y la altura del tallo aumentaron en presencia de nitratos (Fontana *et al.*, 2006). Los resultados del presente estudio mostraron que el nitrato influyó en el rendimiento de verdolaga, sobre todo en los primeros 15 días posteriores al trasplante, pues se observó un crecimiento acelerado en comparación con las últimas semanas, cuando la concentración de nitratos disminuyó considerablemente, mientras que los niveles de NH_4^+ se mantuvieron constantes (Fig. 7A y 7C). En la especie *S. maritima* se ha reportado que la TCR depende de la salinidad y la proporción de N (NO_3^- -N: NH_4^+ -N) del agua de riego (Certain *et al.*, 2021). El crecimiento menor se presentó en la proporción de N de 0:100 independientemente de la salinidad, con una disminución menor en condiciones de alta salinidad (500 mM NaCl), lo cual sugiere que esta especie prefiere los NO_3^- en diferentes niveles de salinidad, pero puede utilizar el NH_4^+ cuando aumenta la salinidad, lo cual coincide con lo observado en este estudio, donde las plantas de *S. edulis* consumieron todos los NO_3^- del medio de cultivo (Fig. 7A), mientras que la concentración de NH_4^+ aumentó al final del experimento, con una conductividad eléctrica de 8.31 dS m^{-1} (Fig. 7C).

Los requerimientos de nutrientes y la densidad óptima de siembra difieren entre las especies de hortalizas de hoja. La producción de estas especies incrementará si se optimizan dichos factores en los sistemas hidropónicos y acuapónicos para cultivar productos comercialmente importantes (Boxman *et al.*, 2017; Maludin *et al.*, 2020). Los sistemas hidropónicos y acuapónicos deben dimensionarse para mantener un equilibrio entre el contenido de nutrientes a partir de la producción de peces y la absorción de los mismos por parte de las plantas (Buzby y Lin, 2014; Boxman *et al.*, 2017). Los resultados contradictorios respecto a los valores de rendimiento de cosecha de *P. oleracea* y *S. edulis* indican que es necesario realizar más investigaciones sobre ambas especies para su producción a nivel comercial.

8.3 Consumo y eficiencia en el uso del agua de *P. oleracea* y *S. edulis* cultivadas en un sistema hidropónico utilizando agua residual de tilapia (*O. niloticus*)

El consumo de agua de verdolaga y el volumen disponible en el tratamiento control sin plantas fue similar durante las cuatro semanas de cultivo (Tabla 5). El consumo de agua de romerito alcanzó un máximo durante las dos últimas semanas que coincidió con la etapa de floración de la especie (Fig. 4). El consumo de agua total fue diferente entre los tres tratamientos, donde la verdolaga presentó una pérdida de agua menor respecto a romerito y el control. La TCR fue similar entre verdolaga y romerito. Sin embargo, al considerar que el consumo de agua fue menor en plantas de verdolaga, se infiere que esta especie fue más eficiente en la acumulación de biomasa seca respecto al romerito, lo cual coincide con lo reportado por De Lacerda y colaboradores (2018), quienes evaluaron el consumo total de agua de *P. oleraceae* y *Eichhornia crassipes* (lirio acuático) en un sistema hidropónico, encontrando que las plantas de verdolaga reflejaron un consumo menor. En el presente estudio, el volumen de agua en el medio de cultivo al final del experimento, mostró una reducción promedio de 76 % en la verdolaga similar a lo reportado por De Lacerda y colaboradores (2015), con una reducción de la solución nutritiva del 69 % cuando cultivaron verdolaga, cuyas plantas no se podaron o cosecharon. Por su parte, el romerito presentó una pérdida del 91 %, lo cual sugiere que esta especie promueve una pérdida de agua mayor respecto a la verdolaga.

El requerimiento de agua para el crecimiento mostró que la EUA fue mayor en verdolaga que en romerito. Al respecto, Brown y colaboradores (1999) determinaron el consumo y la EUA de tres especies halófitas, *Suaeda esteroa*, *Salicornia bigelovii* y *Atriplex barclayana*, cultivadas en lisímetros y regadas con efluente acuícola salino de tilapia; concluyeron que, *S. esteroa* consumió más agua que las otras especies y presentó valores de EUA de 0.89 a 1.68 g L⁻¹ de biomasa seca, los cuales son similares a los reportados en este estudio para *S. edulis*. Los estudios con verdolaga cultivada en macetas con riego a diferentes niveles de salinidad mostraron valores de EUA de 7.93 a 8.88 g L⁻¹ de biomasa fresca (Kiliç *et al.*, 2008), que son menores a los encontrados en el presente estudio, demostrando que la verdolaga en sistema hidropónico disminuye la pérdida de agua. Las plantas halófitas en condiciones de estrés salino reducen la conductividad estomática, que promueve una EUA mayor y reduce la tasa de crecimiento, pero aumenta la fijación de carbono por unidad de agua transpirada (Glenn y

Brown, 1998). La EUA se utiliza como indicador del estrés salino en plantas y disminuye al aumentar la salinidad (Kiliç *et al.*, 2008). En el género *Suaeda*, la EUA disminuye al aumentar la salinidad, lo cual fue demostrado por Brown y colaboradores (1999), cuando evaluaron diferentes niveles de salinidad en el medio de cultivo. En este estudio, el contenido de Na^+ fue mayor en las últimas semanas en romerito en comparación con verdolaga y el control (Fig. 6), lo cual coincide con un aumento en el consumo de agua en la semana tres y cuatro (Fig. 4) y con los valores menores de CRA. Las especies halófitas realizan un ajuste osmótico para mantener el contenido celular de agua ante la disminución en el potencial hídrico externo, provocando cambios en la turgencia, en el CRA y en los solutos acumulados (Flowers y Colmer, 2008). La especie *S. maritima* conserva el agua de manera efectiva con el aumento de la salinidad, excepto cuando la salinidad alta se combina con una proporción de N ($\text{NO}_3^- - \text{NH}_4^+$) de 0:100, lo cual indica que el aumento de NH_4^+ -N en relación con el NO_3^- -N disminuye la función osmoprotectora a alta salinidad (Certain *et al.*, 2021). La respuesta anterior indica que la salinidad influye en el consumo de agua en plantas de verdolaga y romerito; sin embargo, no representa un factor limitante para el crecimiento de ambas especies. Lo anterior permite deducir que la verdolaga es más eficiente en el uso de agua en términos de absorción de agua, estado hídrico de la hoja y contenido de agua celular, mientras que *S. edulis* promueve una pérdida de agua mayor en el sistema de hidroponía.

8.4 Parámetros de calidad y la concentración de nutrientes en el medio de cultivo de *P. oleracea* y *S. edulis*

La conductividad eléctrica (CE), los sólidos disueltos totales (SDT) y la salinidad se incrementaron en todos los tratamientos a través del tiempo (Fig. 5), lo cual se atribuye a la evaporación del medio de cultivo y al consumo de agua por parte de las plantas, debido a que las plantas absorben una cantidad mayor de agua que de nutrientes, causando un aumento de su concentración en el medio de cultivo (Favela *et al.*, 2006). Las tinas de cultivo con romerito presentaron valores mayores de CE y SDT en comparación al control (sin plantas) y a las tinas con verdolaga, lo cual se debió a un consumo de agua mayor por parte de dicha especie. La temperatura, el pH y la concentración de oxígeno disuelto presentaron una respuesta similar en todos los efluentes y se encontraron dentro de los límites óptimos para el desarrollo de la mayoría de las hortalizas. El pH se mantuvo entre 5.5 y 6.0, permitiendo una disponibilidad y

absorción de nutrientes adecuada (Fussy y Papenbrock, 2022), mientras que la concentración de oxígeno disuelto se mantuvo por arriba de 3 mg L^{-1} (Gislerød y Kempton, 1983). La temperatura, el pH, el contenido de oxígeno y la CE deben ajustarse a las necesidades de cada especie para crear condiciones de crecimiento óptimas (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). Las especies halófitas tienen capacidad para tolerar condiciones salinas (Flowers y Colmer, 2008), mientras que la verdolaga y algunas especies del género *Suaeda* se desarrollan en condiciones de salinidad moderada. Estudios previos sobre verdolaga reportan que soporta valores de CE hasta de 6.8 dS m^{-1} (Shannon y Grieve, 1999; Teixeira y Carvalho, 2009; Ngosong *et al.*, 2013) sin mostrar reducción en el rendimiento (Kiliç *et al.*, 2008), mientras que para *S. salsa* y *S. glauca* se reportan crecimientos óptimos hasta 21 dS m^{-1} (Song *et al.*, 2009; Kong y Zheng, 2015), lo cual sugiere que el aumento en CE parece no ser una limitante para el desarrollo de verdolaga y romerito en un sistema de producción hidropónico utilizando como fuente hídrica el efluente de tilapia.

El crecimiento de verdolaga y romerito y la disminución en el contenido de N y P del medio de cultivo indican que el efluente de tilapia proporcionó los nutrientes necesarios para el desarrollo de ambas especies. Estudios anteriores reportan que los efluentes acuícolas complementan o incluso sustituyen el uso de fertilizantes para la producción de hortalizas (Endut *et al.*, 2011, 2016; Omeir *et al.*, 2020), mientras que el efluente de tilapia suministra cantidades adecuadas de N, P y Ca^{2+} para las plantas de *Pelargonium zonale* cultivadas hidropónicamente (Álvarez-García *et al.*, 2019). El efluente utilizado en el presente estudio contenía los seis nutrientes esenciales N, P, S, K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} recomendados en una solución nutritiva (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). La concentración de N disminuyó gradualmente en todos los tratamientos, mientras que el contenido de nitratos (NO_3^-) se consumió en su totalidad en los tratamientos con plantas y el contenido de amonio (NH_4^+) se mantuvo constante en verdolaga y en el control, pero aumentó en el romerito (Fig. 7A y 7B), mostrando que el uso de la solución nutritiva por las plantas contribuyó significativamente a la eliminación de nitratos del medio de cultivo, lo cual coincide con lo reportado en sistemas acuapónicos con plantas de *Spinacia oleracea* y efluente de tilapia (Thomas *et al.*, 2019), *Sesuvium portulacastrum* y *Batis marítima* con peces de *Xiphophorus* sp. (Boxman *et al.*, 2017) e *Ipomoea aquatica* y *Brassica juncea* con bagre *Clarias gariepinus* (Endut *et al.*, 2011). El P disminuyó en todos los tratamientos, pero en

el control la disminución fue menor. Asimismo, se observó que durante los primeros 15 días posteriores al trasplante, el crecimiento de las plantas fue más vigoroso en comparación con la última mitad del periodo de cultivo, lo que coincide con una caída drástica en la concentración de dichos nutrientes. Las plantas absorben diferencialmente los nutrientes del medio de cultivo, debido a que sus necesidades nutrimentales varían de acuerdo con la especie, la etapa de desarrollo y las condiciones ambientales (Favela *et al.*, 2006). Las plantas absorben los iones en concentraciones muy bajas cuando la solución nutritiva se suministra continuamente (Steiner, 1961; Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012), mientras que las soluciones con una concentración alta de nutrientes conducen a una absorción excesiva de nutrientes, ocasionando toxicidad (Fussy y Papenbrock, 2022). En el caso de sistemas de cultivo cerrados, la pérdida de nutrientes se reduce al mínimo (Voogt, 2002); sin embargo, sin un aporte constante de nutrientes, se espera que las concentraciones reducidas de nutrientes no satisfagan la demanda mínima de los mismos (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). En el presente estudio, la concentración inicial de nitrógeno (NO_3^-) en el efluente acuícola fue ligeramente mayor al intervalo recomendado en una solución hidropónica estándar (50 a 200 mg L^{-1}) (Silber y Bar-Tal, 2019); sin embargo, a la mitad del periodo de cultivo la concentración disminuyó en más de 80 % en los tratamientos con plantas y 57 % en el tratamiento control. Asimismo, la concentración de P fue similar a lo recomendado en diversas soluciones nutritivas, en el intervalo de 31 a 60 mg L^{-1} (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012), aunque la concentración de P disminuyó a menos de 3 mg L^{-1} para ambas especies al final del experimento. La disminución en la concentración de los citados nutrientes y los valores de rendimiento obtenidos para ambas especies sugieren que la concentración de N y P en el medio de cultivo fue insuficiente para mantener las necesidades nutrimentales de las plantas durante el periodo de cultivo.

La productividad y absorción de nutrientes por parte de verdolaga y romerito están influenciadas por cambios en la composición de nutrientes del medio de cultivo a través del tiempo. La concentración de K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} en el medio de cultivo presentaron variaciones en el tiempo; el K^+ incrementó un 30 % en el romerito, 50 % en el tratamiento control y disminuyó 35 % en verdolaga, especie que presentó los valores mayores de este nutriente en el tejido vegetal (**Tabla 7**). El Mg^{2+} aumentó en verdolaga, romerito y el control, reflejando un incremento mayor en las últimas semanas, con un aumento de casi seis veces en el romerito y

mayor a tres veces en la verdolaga y el control. A su vez, el Ca^{2+} presentó una disminución de poco más de 15 % en verdolaga y romerito, disminuyendo hasta 26 % en el control. La composición de la solución nutritiva influye en el desarrollo vegetal, debido a que existe una relación mutua entre los aniones (NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-}) y cationes (K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) presentes en el medio de cultivo. Al respecto, el rendimiento de biomasa se reduce cuando existe una relación inadecuada entre iones (Steiner, 1961). La proporción en la que se encuentran dichos minerales debe corresponder con las tasas de absorción de cada cultivo, de lo contrario, conducirá a la acumulación o al agotamiento de ciertos elementos (Voogt, 2002). La mezcla de efluentes acuícolas con solución hidropónica o adición de microelementos mejora el desarrollo vegetal (Rosales-Nieblas, 2018; Álvarez-García *et al.*, 2019). La absorción de Ca^{2+} y el Mg^{2+} es más difícil respecto al K^+ y los NO_3^- , pues su absorción requiere una acumulación relativamente mayor con respecto a K^+ en el entorno de la raíz (Voogt, 2002). En el presente estudio se observó una respuesta similar, toda vez que el N y el P se agotaron mientras que el Mg^{2+} se acumuló en el efluente de ambas especies; por su parte, el K^+ incrementó en romerito. La comparación de los valores promedio del contenido de nutrientes en la biomasa aérea (**Tabla 7**), muestra que las plantas de verdolaga presentaron un contenido mayor de K^+ , respecto al Ca^{2+} y el Mg^{2+} , exhibiendo síntomas asociados a deficiencia de Ca^{2+} (Kong *et al.*, 2014). El romerito mostró valores de Ca^{2+} menores, mientras que el K^+ y Mg^{2+} fueron similares. La concentración inicial de K^+ y Mg^{2+} en el medio de cultivo fue mayor a los valores máximos reportados en diversas soluciones nutritivas de 200 y 50 mg L^{-1} , respectivamente (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012; Silber y Bar-Tal, 2019) y se mantuvieron por encima de la concentración máxima hasta el final del periodo de cultivo. Sin embargo, las plantas no mostraron síntomas de toxicidad. Los resultados reportados por Álvarez-García y colaboradores (2019) en efluente de tilapia mostraron concentraciones menores de K^+ y Mg^{2+} (31 y 8 mg L^{-1} , respectivamente). La concentración inicial de Ca^{2+} fue similar al límite máximo de 200 mg L^{-1} (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012; Silber y Bar-Tal, 2019), la cual se mantuvo dentro del intervalo recomendado a lo largo del experimento. Los resultados anteriores sugieren que el efluente de tilapia contiene los nutrientes necesarios para el desarrollo vegetal y pueden utilizarse como sustituto a la fertilización, pero es necesario un suministro constante o recambio periódico del medio de cultivo, o bien un ajuste en la composición mediante la adición de soluciones nutritivas.

Los resultados del presente estudio indican que verdolaga y romerito pueden ejercer un impacto potencial benéfico en la remoción de nutrientes (N, P y K^+) del medio de cultivo y que el efluente proveniente del cultivo de tilapia contiene los nutrientes necesarios (N, P, Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+) para el cultivo de dichas especies en sistema hidropónico. Sin embargo, la productividad potencial está limitada debido a la disminución en el contenido de N y P con el transcurso del tiempo. No obstante, estas especies muestran una respuesta positiva a los nutrientes presentes en este tipo de efluente y pueden crecer sin la adición de fertilizantes adicionales.

8.5 Concentración de nutrientes en la biomasa aérea de *P. oleracea* y *S. edulis*

En el presente estudio se observaron diferencias en el contenido de macronutrientes principales en el tejido vegetal de verdolaga y romerito (**Tabla 7**). El contenido de K^+ y Mn^{2+} en la biomasa aérea fue mayor en plantas de verdolaga, mientras que el contenido de Na^+ y el Mg^{2+} fue mayor en plantas de romerito. La concentración de Fe y Ca^{2+} no reflejó diferencias significativas entre especies. Los estudios previos muestran que el contenido de K^+ fue mayor, seguido de Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} en plantas de verdolaga (Grieve y Suarez, 1997), lo cual coincide con los resultados del presente estudio, mismos que también coinciden con lo reportado por Alam y colaboradores (2014) en verdolaga, en cuyos tejidos se presentaron concentraciones de minerales en el orden siguiente, $K^+ > N > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > P > Fe > Zn^{2+} > Mn^{2+}$. Sin embargo, la presente investigación difiere con los citados estudios en el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Los reportes para el género *Suaeda* muestran que el contenido de Na^+ fue mayor respecto al Cl^- , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en plantas de *S. fruticosa* (Khan *et al.*, 2000), las cuales reflejaron un contenido mayor de Na^+ y K^+ en hojas y tallos, al igual que las plantas de romerito del presente estudio. El contenido de minerales de verdolaga fue menor al reportado por Alam y colaboradores (2014), quienes estudiaron plantas de verdolaga común (accesión V12) cultivadas en macetas durante 60 días, reportando valores de contenido para K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe y Mn^{2+} de 478, 97.2, 43.2, 46, 8.66 y 1.64 g kg^{-1} , respectivamente. En otro estudio con verdolaga cultivada durante 44 días en tanques con arena y regada con agua salina de drenaje (2.1 dS m^{-1}) (Grieve y Suarez, 1997), el contenido de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} fue de 15.3, 12.9 y 14.04 g kg^{-1} , respectivamente, siendo ligeramente mayor; por su parte, el contenido de K^+ fue dos veces mayor (94.2 g kg^{-1}) que en este estudio. Las especies de quelite o plantas de hoja comestible contienen los elementos clave para el crecimiento y

desarrollo general del cuerpo humano (Alam *et al.*, 2014), pues se han reportado contenidos de Ca^{2+} , I^- , $\text{Fe}^{2+,3+}$, P y Zn^{2+} , así como elementos traza como Mg^{2+} y Cu^{2+} , necesarios en la dieta (Latham, 2002). La verdolaga y el romerito por su contenido alto de nutrientes, vitaminas y antioxidantes se consideran especies beneficiosas para los humanos (Grieve y Suarez, 1997; Alam *et al.*, 2014; Song y Wang, 2015). La verdolaga acumula en sus hojas minerales como Ca^{2+} , Mg^{2+} y Zn^{2+} , mientras que la concentración de K^+ y Na^+ es mayor en los tallos (Grieve y Suarez, 1997; Teixeira y Carvalho, 2009). En plantas de *S. fruticosa* la concentración de K^+ en la biomasa aérea es mayor respecto a la raíz (Khan *et al.*, 2000), por lo que dichas especies son fuente de los minerales esenciales requeridos en la dieta humana.

Los estudios asociados a la salinidad y concentración de iones en el tejido vegetal concluyen que la salinidad afecta la concentración y distribución de iones en la biomasa aérea de verdolaga. Al respecto, Teixeira y Carvalho (2009) determinaron el efecto del estrés salino (0.8, 6.8, 12.8 y 24.2 dS m^{-1}) en la composición química de verdolaga y reportaron que la salinidad no afectó la concentración de Mg^{2+} pero si observaron un ligero aumento en tallos y hojas. La concentración de Ca^{2+} , K^+ y Zn^{2+} disminuyó mientras que la acumulación de Na^+ y Cl^- se elevó al incrementar la concentración de la salinidad. Por su parte, Grieve y Suarez (1997) evaluaron el crecimiento de verdolaga cultivada en condiciones salinas (2.1 control, 15.2 y 28.5 dS m^{-1}) y encontraron que a medida que la salinidad incrementó, la concentración de Ca^{2+} y K^+ disminuyó, mientras que el Na^+ y el Mg^{2+} aumentaron. En el presente estudio, el contenido de dichos nutrientes fue menor a lo reportado por Grieve y Suarez (1997), incluso cuando el contenido de Na^+ en el efluente utilizado incrementó de 340 a 625 ppm, con una CE final de 5.68 dS m^{-1} . Estudios previos reportaron que el contenido de K^+ tiene una correlación negativa con el Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que el Ca^{2+} se correlaciona negativamente con el Zn^{2+} y el Mn^{2+} , en tanto el Mg^{2+} se correlaciona negativamente con el Zn^{2+} , $\text{Fe}^{2+,3+}$ y Mn^{2+} (Alam *et al.*, 2014). La respuesta anterior es similar a los valores registrados en verdolaga en el presente estudio, toda vez que el contenido de K^+ fue mayor en comparación con el Mg^{2+} y el Ca^{2+} , cuyas concentraciones fueron similares; por su parte, el Mn^{2+} y el $\text{Fe}^{2+,3+}$ presentaron la concentración menor en el tejido vegetal. En un estudio de Khan y colaboradores (2000), la salinidad afectó la concentración de Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ en *S. fruticosa*, de manera particular la concentración de Na^+ y Cl^- en la biomasa aérea incrementó con el aumento de la salinidad, en tanto la concentración de Mg^{2+} y K^+

disminuyeron. En el presente estudio, el romerito mostró un contenido mayor de Na^+ respecto al contenido de K^+ y Ca^{2+} , en tanto la salinidad en el medio de cultivo incrementó de 340 a 902 ppm, con una CE final de 8.31 dS m^{-1} . Los resultados indican que el contenido de nutrientes menor en el tejido vegetal se debe a una disminución en su concentración en el medio de cultivo conforme transcurre el tiempo y no al aumento de salinidad en el medio.

En un estudio con verdolaga, la concentración Na^+ en tejidos vegetales mostró una acumulación progresiva (666, 1970 y $3133 \text{ mmol kg}^{-1}$ de biomasa seca) conforme aumentó la salinidad en el agua de riego (Grieve y Suarez, 1997), donde el contenido de Na^+ en el control fue equivalente a 15.3 g kg^{-1} , similar a los valores encontrados en el presente estudio. En otra investigación con verdolaga, los autores concluyeron que dicha especie extrae Na^+ y Cl^- de suelos con salinidad media y que el contenido de Na^+ en la biomasa aérea presentó una acumulación progresiva (1.20, 1.72, 1.8 y 2.06 %) a niveles mayores de salinidad (0.65 control, 3.5, 5.0 y 6.4 dS m^{-1}) (Kiliç *et al.*, 2008). Los reportes sobre el contenido de Na^+ en biomasa aérea de *S. edulis* son nulos o escasos; sin embargo, en especies del mismo género como *S. maritima* se reportan que son acumuladoras de sales (Khan *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2009; Labidi *et al.*, 2010), estimándose que a partir de 1 g de peso seco de muestra vegetal se acumulan 183.76 mg de NaCl (Ravindran *et al.*, 2007). En el presente estudio, *S. edulis* retuvo 44.8 mg de Na^+ , siendo mayor su acumulación, comparada con plantas de verdolaga. Las plantas halófitas en condiciones salinas acumulan y compartimentan iones Na^+ y Cl^- en las vacuolas para disminuir el potencial osmótico, lo que les permite utilizar menos energía en la síntesis de osmolitos o solutos orgánicos para equilibrar la presión osmótica celular (Yazici *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2009). Tal respuesta les permite utilizar los mencionados iones como osmolitos, que son energéticamente menos costosos (Ravindran *et al.*, 2007). La verdolaga tiene la capacidad de acumular más K^+ que Na^+ en la biomasa aérea (Grieve y Suarez, 1997; Kiliç *et al.*, 2008); sin embargo, después del primer corte la naturaleza halófila de la verdolaga se expresa y su tolerancia a la salinidad aumenta con las cosechas posteriores (Grieve y Suarez, 1997). El aumento de la salinidad provoca que el Na^+ se absorba preferentemente sobre otros cationes, por ejemplo, K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , provocando un incremento en la acumulación de iones Na^+ y Cl^- en las hojas (Grieve y Suarez, 1997; Karakaş *et al.*, 2017). La respuesta de verdolaga a este tipo de estrés mejora su capacidad antioxidante y aumenta el contenido de prolina en el citosol (Yazici *et al.*, 2007). Las

especies del género *Suaeda*, incluyendo *S. maritima* y *S. fruticosa* acumulan Na^+ en las células de las hojas, el cual es secuestrado en las vacuolas, reduciendo la concentración de Na^+ en el citosol y contribuyendo al ajuste osmótico para mantener la turgencia y expansión celular (Ravindran *et al.*, 2007; Labidi *et al.*, 2010). En plantas de *S. fruticosa* y *S. salsa* la concentración de Na^+ en las hojas incrementó al aumentar la salinidad (Khan *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2009). La halófito *S. fruticosa* hiperacumula Na^+ en el tejido foliar y secreta Na^+ y Cl^- como mecanismo para el control de la salinidad (Labidi *et al.*, 2010). Los resultados anteriores indican que las plantas de verdolaga poseen una selectividad mayor para captar K^+ sobre Na^+ del efluente de tilapia contrario a *S. edulis*.

El efluente acuícola presentó concentraciones de nutrientes adecuadas para la producción vegetal; sin embargo, no corresponden con un contenido mayor de nutrientes en la biomasa aérea ni con un aumento en el rendimiento vegetal. En estudios previos se reporta que las cualidades nutritivas y antioxidantes, así como el rendimiento de verdolaga, mejoran mediante el cultivo sin suelo y la selección de medios de cultivo adecuados (Cros *et al.*, 2007; Alu'datt *et al.*, 2019). Las plantas de verdolaga y romerito exhiben atributos adecuados para cultivarse en sistema hidropónico con efluente acuícola de tilapia. Ambas especies pueden utilizarse como hortalizas de hoja debido a su valor nutricional, porque contienen minerales esenciales (Ca^{2+} , Fe y Mg^{2+}) requeridos en la dieta humana, al mismo tiempo que extraen sales del medio de cultivo.

Los resultados del presente estudio mostraron que la verdolaga es una especie vegetal con potencial mayor para la explotación agrícola, debido a sus requerimientos nutricionales bajos, al uso más eficiente de agua y a su valor nutricional alto. La siembra de verdolaga utilizando sistemas hidropónicos permite incorporar el efluente de tilapia como fuente hídrica y de nutrientes, que es de particular importancia en las regiones áridas donde los recursos agua y suelo son limitados. Sin embargo, se requieren más estudios que permitan incorporar estas especies en la industria alimentaria y que se apliquen prácticas adecuadas de cultivo para mejorar su calidad y rendimiento.

9. CONCLUSIONES

La respuesta diferencial en el desarrollo morfo métrico y fisiológico entre las especies verdolaga y romerito fue evidente al cultivarse en sistema hidropónico con agua residual de acuicultura (*O. niloticus*), la cual se manifestó en un mayor rendimiento y mejor eficiencia en el uso de agua reflejado en verdolaga.

El sistema hidropónico con efluente acuícola proporciona los requerimientos de agua necesarios para el crecimiento de verdolaga y romerito. Sin embargo, la verdolaga es más eficiente en el uso de agua en términos de absorción, estado hídrico de la hoja y contenido celular, mientras que el romerito promueve una pérdida de agua más notoria.

Los valores de producción de verdolaga y romerito utilizando efluente de tilapia fueron bajos, evidenciando que la concentración de N y P en el medio de cultivo fueron insuficiente para mantener las necesidades nutrimentales de las plantas durante un periodo prolongado. Sin embargo, el rendimiento mayor se obtuvo en plantas de verdolaga, siendo necesario realizar más investigaciones escalando las condiciones experimentales de cultivo para evaluar la producción a nivel comercial.

El efluente del cultivo de tilapia presenta características físicas y químicas adecuadas, así como los nutrientes necesarios para la producción de verdolaga y romerito. El cultivo y desarrollo de plantas en sistema hidropónico contribuye a disminuir significativamente la concentración de nitratos y P del medio de cultivo, lo que contribuye a mejorar la calidad del agua.

Las plantas de verdolaga y romerito absorben del medio de cultivo nutrientes esenciales requeridos en la dieta humana, los cuales se acumulan en la biomasa aérea, por lo que pueden utilizarse como hortalizas con valor nutricional alto, al mismo tiempo que extraen sales del medio de cultivo. La verdolaga mostró una regulación mayor en la absorción de iones Na^+ del medio de cultivo en comparación con romerito, lo cual se manifestó en el contenido mayor de K^+ en el tejido vegetal.

9.1 Perspectivas

Los resultados obtenidos confirman que los efluentes acuícolas pueden utilizarse como sustituto de la fertilización orgánica en sistemas hidropónicos, porque no tiene efectos perjudiciales sobre el crecimiento o el desarrollo de hortalizas. Las plantas de verdolaga y romerito presentan atributos adecuados para cultivarse en el sistema hidropónico con efluentes que proveen el agua y los nutrientes necesarios para su desarrollo. La respuesta de ambas especies es importante en regiones donde el recurso agua y suelo se encuentran limitados, porque posibilita el cultivo de especies de vida corta y con valor nutricional alto con recursos limitados.

La necesidad de diseñar sistemas hidropónicos es preponderante en zonas con déficit hídrico y que a la vez la demanda de alimentos se incrementa con el crecimiento poblacional, pues se requieren sistemas con un equilibrio óptimo entre el tamaño del sistema, la concentración de nutrientes provistos por efluente acuícola, la tasa de absorción por parte de las plantas y la densidad de siembra. El cultivo hidropónico de especies con efluente de tilapia tiene un potencial prometedor para producir verdolaga de alta calidad con características de valor agregado que le permitan incorporarla en la industria alimentaria y promoverla como alimento alternativo para contribuir a la seguridad alimentaria en las regiones semiáridas sujetas a condiciones desfavorables.

10. LITERATURA CITADA

- Ahmed, N., Thompson, S. y Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental Management*, 63: 159-172. doi: 10.1007/s00267-018-1117-3.
- Alam, M.A., Juraimi, A.S., Rafii, M.Y., Hamid, A.A., Aslani, F., Hasan, M.M., Mohd, A., Mohd, Z. y Uddin, K. (2014). Evaluation of antioxidant compounds, antioxidant activities, and mineral composition of 13 collected purslane (*Portulaca oleracea* L.) accessions. *BioMed Research International*, 2014: 296063. doi: 10.1155/2014/296063.
- Alu'datt, M.H., Rababah, T., Alhamad, M. N., Al-Tawaha, A., Al-Tawaha, A.R., Gammoh, S., Ereifej, K.I., Al-Karaki, G., Hamasha, H.R., Tranchant, C.C. y Kubow, S. (2019). Herbal yield, nutritive composition, phenolic contents and antioxidant activity of purslane (*Portulaca oleracea* L.) grown in different soilless media in a closed system. *Industrial Crops and Products*, 141: 111746. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111746.
- Álvarez-García, M., Urrestarazu, M., Guil-Guerrero, J.L. y Jiménez-Becker, S. (2019). Effect of fertigation using fish production wastewater on Pelargonium x zonale growth and nutrient content. *Agricultural Water Management*, 223: 105726. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105726.
- Anastácio, A. y Carvalho, I.S. (2013). Accumulation of fatty acids in purslane grown in hydroponic salt stress conditions. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64(2): 235-242. doi: 10.3109/09637486.2012.713915.
- Anderson, J.L., Asche, F., Garlock, T. y Chu, J. (2017). Aquaculture: Its role in the future of food. En: *World agricultural resources and food security*. Emerald, Bingley, Inglaterra, pp. 159-173.
- Bouain, N., Krouk, G., Lacombe, B. y Rouached, H. (2019). Getting to the root of plant mineral nutrition: Combinatorial nutrient stresses reveal emergent properties. *Trends in Plant Science*, 24(6): 542-552. doi: 10.1016/j.tplants.2019.03.008.
- Boxman, S.E., Nystrom, M., Capodice, J.C., Ergas, S.J., Main, K.L. y Trotz, M.A. (2017). Effect of support medium, hydraulic loading rate and plant density on water quality and growth of halophytes in marine aquaponic systems. *Aquaculture Research*, 48(5): 2463-2477. doi: 10.1111/are.13083.
- Bradshaw, A.D. (2006). Unravelling phenotypic plasticity: Why should we bother? *The New Phytologist*, 170(4): 644-648. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/3694402>.
- Brown, J.J. y Glenn, E.P. (1999). Reuse of highly saline aquaculture effluent to irrigate a potential forage halophyte, *Suaeda esteroa*. *Aquacultural Engineering*, 20(2): 91-111. doi: 10.1016/S0144-8609(99)00009-6.
- Brown, J.J., Glenn, E.P., Fitzsimmons, K.M. y Smith, S.E. (1999). Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture*, 175(3): 255-268. doi: 10.1016/S0044-8486(99)00084-8.
- Buhmann, A. y Papenbrock, J. (2013). Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 122-133. doi: 10.1016/j.envexpbot.2012.07.005.
- Buzby, K.M. y Lin, L.S. (2014). Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering*, 63: 39-44. doi: 10.1016/j.aquaeng.2014.09.002.
- Bye, B.R.A. y Linares, M.E. (2000). Los quelites, plantas comestibles: una reflexión sobre intercambiocultural. *Biodiversitas*, 31: 11-14.
- Castro-Lara, D., Bye-Boettler, R., Basurto-Peña, F., Mera-Ovando, L.M., Rodríguez-Servin, J., Álvarez-Vega, J., Morales de León, J. y Caballero-Roque, A. (2014). Revalorización,

- conservación y promoción de quelites: Una tarea conjunta. *Agroproductividad*, 7(1): 8-12. Disponible en: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/497>.
- Castro, D., Basurto, F., Mera, L. y Bye, R. (2009). Quelites en mercados del centro de México. En: *Resúmenes del VII Congreso Mexicano de Etnobiología*, Asociación Etnobiológica Mexicana A. C. Hidalgo, México.
- Castro, L.D., Basurto, P.F., Mera, O.L.M. y Bye, B.R.A. (2011). Los quelites, tradición milenaria en México. Universidad Autónoma de Chapingo, Estado de México. ISBN: 9786071202024.
- Certain, C., Patrona, L.D., Gunkel-Grillon, P., Léopold, A., Soudant, P. y Le Grand, F. (2021). Effect of salinity and nitrogen form in irrigation water on growth, antioxidants and fatty acids profiles in halophytes *Salsola australis*, *Suaeda maritima*, and *Enchylaena tomentosa* for a perspective of biosaline agriculture. *Agronomy*, 11(3): 449. doi: 10.3390/agronomy11030449.
- Chávez, C., Fuentes, C. y Ventura, R.E. (2010). Uso eficiente del agua de riego por gravedad utilizando yeso y poliacrilamida. *Terra Latinoamericana*, 28(3): 231-238. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792010000300005&script=sci_arttext.
- CONABIO. (2020). Quelites. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/quelites>. [consulta: 25 abril 2021].
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México, edición 2018. Ciudad de México. Disponible en: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- CONAGUA. (2010). Estadísticas del agua en México, edición 2010. Distrito Federal. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/eam2010-16junio2010.pdf>.
- Cros, V., Martínez-Sánchez, J.J. y Franco, J.A. (2007). Good yields of common purslane with a high fatty acid content can be obtained in a peat-based floating system. *HortTechnology*, 17(1): 14-20. doi: 10.21273/HORTTECH.17.1.14.
- da Rocha, A.F., Biazetti, F.M.L., Stech, M.R. y da Silva, R.P. (2017). Lettuce production in aquaponic and biofloc systems with silver catfish *Rhamdia quelen*. *Boletim do Instituto de Pesca*, especial (44): 64-73. doi: 10.20950/1678-2305.2017.64.73.
- de Lacerda, L.P., Lange, L.C., Costa, F.M.G. y Diniz, L.M.M. (2018). Growth and differential salinity reduction between *Portulaca oleracea* and *Eichhornia crassipes* in experimental hydroponic units. *Environmental Technology*, 40(17): 2267-2275. doi: 10.1080/09593330.2018.1439536.
- de Lacerda, L.P., Lange, L.C., Costa, F.M.G. y Zonta, E. (2015). Salinity reduction and biomass accumulation in hydroponic growth of purslane (*Portulaca oleracea*). *International Journal of Phytoremediation*, 17(3): 235-241. doi: 10.1080/15226514.2014.883494.
- Dey, M.M., Paraguas, F.J., Kambewa, P. y Pemsil, D.E. (2010). The impact of integrated aquaculture-agriculture on small-scale farms in Southern Malawi. *Agricultural Economics*, 41(1): 67-79. doi: 10.1111/j.1574-0862.2009.00426.x.
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R.A., Del Ángel-Pérez, A.L., Ruíz-Corral, A., Medina-García, G. y Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVII(Especial): 267-275. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.069.
- Effendi, H., Wahyuningsih, S. y Wardiatno, Y. (2017). The use of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation wastewater for the production of romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) in water recirculation system. *Applied Water Science*, 7(6): 3055-3063. doi: 10.1007/s13201-016-0418-z.

- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N. y Wan Nik, W.B. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 32(1-3): 422-430. doi: 10.5004/dwt.2011.2761.
- Endut, A., Lananan, F., Abdul Hamid, S.H., Jusoh, A. y Wan Nik, W.N. (2016). Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by African catfish (*Clarias gariepinus*) in scaling aquaponic recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 57(60): 29531-29540. doi: 10.1080/19443994.2016.1184593.
- Favela, C.E., Preciado, R.P. y Benavides, M.A. (2006). Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Torreón, México. ISBN: 96-8844-051-5.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental: FCEA. (2017). Sistemas de riego y disponibilidad del agua. Disponible en: <https://agua.org.mx/actualidad/tipos-riego-disponibilidad-del-agua/>. [consulta: 27 abril 2021].
- Fenech-Larios, L., Troyo-Diéguez, E., Trasviña-Castro, M., Ruiz-Espinoza, F., Beltrán-Morales, A., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J. y Zamora-Salgado, S. (2009). Relación entre un método no destructivo y uno de extracción destructivo, para medir el contenido de clorofila en hojas de plántula de albahaca (*Ocimum basilicum* L). *Universidad y Ciencia*, 25(1): 99-102. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v25n1/v25n1a8.pdf>.
- Fimbres-Acedo, Y.E., Servín-Villegas, R., Garza-Torres, R., Endo, M., Fitzsimmons, K.M., Emerenciano, M.G.C., Magallón-Servín, P., López-Vela, M. y Magallón-Barajas, F.J. (2020). Hydroponic horticulture using residual waters from *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology in photoautotrophic conditions with *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research*, 51(10): 4340-4360. doi: 10.1111/are.14779.
- Flowers, T.J. y Colmer, T.D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*. 179:945-963. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/25150520>.
- Fontana, E., Hoeberechts, J., Nicola, S., Cros, V., Palmegiano, G.B. y Peiretti, G.P. (2006). Nitrogen concentration and nitrate/ammonium ratio affect yield and change the oxalic acid concentration and fatty acid profile of purslane (*Portulaca oleracea* L.) grown in a soilless culture system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(14): 2417-2424. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2633>.
- Fussy, A. y Papenbrock, J. (2022). An overview of soil and soilless cultivation techniques: Chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants*, 11(9): 1153. doi: 10.3390/plants11091153
- Geilfus, C.M. (2019). Nutrient deficiencies. En: *Controlled environment horticulture: improving quality of vegetables and medicinal plants*. Springer, Cham, Switzerland, pp. 57-67.
- Gislerød, H.R. y Kempton, R.J. (1983). The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato culture. *Scientia Horticulturae*, 20(1): 23-33. doi: 10.1016/0304-4238(83)90108-5.
- Glenn, E.P. y Brown, J.J. (1998). Effects of soil salt levels on the growth and water use efficiency of *Atriplex canescens* (Chenopodiaceae) varieties in drying soil. *American Journal of Botany*, 85(1): 10-16. doi: doi.org/10.2307/2446548.
- Graber, A. y Junge, R. (2009). Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246: 147–156. doi:10.1016/j.desal.2008.03.048.

- Grieve, C.M. y Suarez, D.L. (1997). Purslane (*Portulaca oleracea* L.): A halophytic crop for drainage water reuse systems. *Plant and Soil*, 192(2): 277-283. doi: 10.1023/A:1004276804529.
- Hsiao, T.C., Steduto, P. y Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science*, 25: 209-231. doi: 10.1007/s00271-007-0063-2.
- Jensen, M.H. (1997). Hidroponics. *HortScience*, 32(6): 1018-1021.
- Karakaş, S., Çullu, M.A. y Dikilitaş, M. (2017). Comparison of two halophyte species (*Salsola soda* and *Portulaca oleracea*) for salt removal potential under different soil salinity conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 41(3): 183-190. doi: 10.3906/tar-1611-82.
- Khan, M.A., Ungar, I.A. y Showalter, A.M. (2000). The effect of salinity on the growth, water status, and ion content of a leaf succulent perennial halophyte, *Suaeda fruticosa* (L.) Forssk. *Journal of Arid Environments*, 45(1): 73-84. doi: 10.1006/jare.1999.0617.
- Kiliç, C.C., Kukul, Y.S. y Anaç, D. (2008). Performance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) as a salt-removing crop. *Agricultural Water Management*, 95(7): 854-858. doi: 10.1016/j.agwat.2008.01.019.
- Kong, Y., Rozema, E. y Zheng, Y. (2014). The effects of NaCl on calcium-deficiency disorder vary with symptom development stage and cultivar in hydroponic *Portulaca oleracea* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(7): 1195-1201. doi: 10.4141/cjps2013-390.
- Kong, Y. y Zheng, Y. (2015). *Suaeda glauca* can be produced hydroponically at moderate NaCl salinity. *HortScience*, 50(6): 847-850. doi: 10.21273/hortsci.50.6.847.
- Labidi, N., Ammari, M., Mssedi, D., Benzerti, M., Snoussi, S. y Abdelly, C. (2010). Salt excretion in *Suaeda fruticosa*. *Acta Biologica Hungarica*, 61(3): 299-312. doi: 10.1556/abiol.61.2010.3.6.
- Lara, L.J., Egea-Gilabert, C., NiÑirola, D., Conesa, E. y Fernández, J.A. (2011). Effect of aeration of the nutrient solution on the growth and quality of purslane (*Portulaca oleracea*). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 86(6): 603-610. doi: 10.1080/14620316.2011.11512810.
- Latham, M.C. (2002). Minerales. En: *Nutrición humana en el mundo en desarrollo*. FAO, Roma. ISBN: 9253038187. Disponible en: <https://www.fao.org/3/w0073s/w0073s00.htm>.
- Linares, E., Bye, R., Ortega, N. y Arce, A.E. (2017). Quelites: sabores y saberes del sureste del Estado de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. doi: 10.22201/ib.9786073016667e.2019.
- Linares, M.E. y Bye, B.R. (2015). Las especies subutilizadas de la milpa. *Revista Digital Universitaria*, 16(5): 1607-6079. Disponible en: https://www.ru.tic.unam.mx/tic/bitstream/handle/123456789/2316/art35_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- López-Anchondo, A.N., López-Ortiz, C.E., Mejía-Hernández, C.M. y López-de-la-Cruz, D. (2016). Hidroponía una alternativa sustentable para el cultivo sin suelo: características y aspectos básicos. En: *Tópicos selectos de sustentabilidad: un reto permanente*. Volumen IV. Clave editorial, Distrito Federal, pp. 31-54.
- Maludin, A.J., Lum, M.S., Mohd L.M. y Gobilik, J. (2020). Optimal plant density, nutrient concentration and rootzone temperature for higher growth and yield of *Brassica rapa* L. 'Curly Dwarf Pak Choy' in raft hydroponic system under tropical climate. *Transactions on Science and Technology*, 7(4): 178-188. Disponible en: <https://tost.unise.org/pdfs/vol7/no3-2/7x3-2x178-188xOA.pdf>.

- Medrano-González, F. (2012). Climatología de las zonas áridas y semiáridas. En: *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. SEMARNAT/INE, Distrito Federal, pp. 9-25. Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/las-zonas-aridas-y-semiari-das-de-mexico-y-su-vegetacion/>.
- Mera, O.L.M., Castro, L.D., Bye, B.R. y Villanueva, V.C. (2010). Importancia de la verdolaga en México. UNAM, Instituto de Biología, Distrito Federal. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168850/Importancia_de_la_Verdolaga_en_M_xico.pdf.
- Missouri Botanical Garden. (2022). Tropicos.org. Disponible en: <https://tropicos.org/name/26200154>. [consulta: 16 agosto 2022].
- Molden, D., Amarasinghe, U. y Hussain, I. (2001). *Water for rural development: background paper on water for rural development prepared for the World Bank*. Working Paper 32. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. ISBN: 9290904593.
- Ngosong, C., Halpern, M.T., Whalen, J.K. y Smith, D.L. (2013). Purslane (*Portulaca oleracea* L.) has potential for desalinizing greenhouse recirculation water. *Canadian Journal of Plant Science*, 93(5): 961-964. doi: 10.4141/CJPS2012-271.
- Nicola, S., Hoeberechts, J. y Fontana, E. (2007). Ebb-and-flow and floating systems to grow leafy vegetables: a review for rocket, corn salad, garden cress and purslane. En: *Acta Horticultura e International Society for Horticultural Science (ISHS)*, Leuven, Belgium, pp. 585-593. Disponible en: https://www.ishs.org/ishs-article/747_76
- Noguez-Hernández, R., Carballo-Carballo, A. y Flores-Olvera, H. (2013). *Suaeda edulis* (chenopodiaceae), una nueva especie de lagos salinos del centro de México. *Botanical Sciences*, 91(1): 19-25. doi: 10.17129/botsci.400.
- Omeir, K.M., Jafari, A., Shirmardi, M. y Roosta, H. (2020). Effects of irrigation with fish farm effluent on nutrient content of basil and purslane. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90(4): 825-831. doi: 10.1007/s40011-019-01155-0.
- Palta, J.P. (1990). Leaf chlorophyll content. *Remote Sensing Reviews*, 5(1): 207-213. doi: 10.1080/02757259009532129.
- Petropoulos, S.A., Karkanis, A., Fernandes, Â., Barros, L., Ferreira, I.C.F.R., Ntatsi, G., Petrotos, K., Lykas, C. y Khah, E. (2015). Chemical composition and yield of six genotypes of common purslane (*Portulaca oleracea* L.): An alternative source of omega-3 fatty acids. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(4): 420-426. doi: 10.1007/s11130-015-0511-8.
- Poorter, H. y Nagel, O. (2000). The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Functional Plant Biology*, 27(12): 1191. doi: 10.1071/PP99173_CO.
- Ravindran, K.C., Venkatesan, K., Balakrishnan, V., Chellappan, K.P. y Balasubramanian, T. (2007). Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(10): 2661-2664. doi: 10.1016/j.soilbio.2007.02.005.
- Román-Cortés, N.R., García-Mateos, M del R., Castillo-González, A.M., Sahagún-Castellanos, J. y Jiménez-Arellanes, M.A. (2018). Características nutricionales y nutraceuticas de hortalizas de uso ancestral en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(3): 245-253. doi: 10.35196/rfm.2018.3.245-253.
- Rosales-Nieblas, A.C. (2022). Respuesta de *Chenopodium ambrosioides* L. y *Portulaca oleracea* L. a dosis de microelementos y tipo de sustrato cultivadas con efluente acuícola. *Tesis de Maestría*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C.S., México.

- Rosales-Nieblas, A.C. (2018). Respuesta fisiológica y morfométrica del epazote (*Chenopodium ambrosioides* L.) a concentraciones de cloruro de sodio en un medio hidropónico. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, México.
- SADER. (2018). La actividad agrícola en Baja California Sur. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/bajacaliforniasur/articulos/la-actividad-agricola-en-baja-california-sur?idiom=es#:~:text=>. [consulta: 28 abril 2021].
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A. y López-Cruz, I.L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2): 177-183. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a12.pdf>.
- Santiago-Saenz, Y.O., Hernández-Fuentes, A.D., López-Palestina, C.U., Garrido-Cauich, J.H., Alatorre-Cruz, J.M. y Monroy-Torres, R. (2019). Importancia nutricional y actividad biológica de los compuestos bioactivos de quelites consumidos en México. *Revista Chilena de Nutrición*, 46(5): 593-605. doi: 10.4067/S0717-75182019000500593.
- SEMARNAT. (2019). Informe de la situación del medio ambiente en México, 2018. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Shannon, M.C. y Grieve, C.M. (1999). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78:5-38. doi: 10.1016/S0304-4238(98)00189-7.
- SIAP. (2019a). Verdolaga. En: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726344/Verdolaga.pdf>.
- SIAP. (2019b). Romerito. En: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/726319/Romerito.pdf>.
- SIAP. (2019c). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. En: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. [consulta: 1 abril 2021].
- Silber, A. y Bar-Tal, A. (2019). Nutrition of substrate-grown plants. En: *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier: Amsterdam, pp. 197-257. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Avner-Silber/publication/332235948_Chemical_Characteristics_of_Soilless_Media/links/625e92ad709c5c2adb86e7cb/Chemical-Characteristics-of-Soilless-Media.pdf#page=218.
- Sleimi, N. y Abdelly, C. (2002). Growth and mineral nutrition of some halophytes under seawater irrigation. En: *Prospects for saline agriculture*. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 403-410. doi: 10.1007/978-94-017-0067-2_41.
- Song, J., Chen, M., Feng, G., Jia, Y., Wang, B. y Zhang, F. (2009). Effect of salinity on growth, ion accumulation and the roles of ions in osmotic adjustment of two populations of *Suaeda salsa*. *Plant and Soil*, 314(1): 133-141. doi: 10.1007/s11104-008-9712-3.
- Song, J. y Wang, B. (2015). Using euhalophytes to understand salt tolerance and to develop saline agriculture: *Suaeda salsa* as a promising model. *Annals of Botany*, 115(3): 541-553. doi: 10.1093/aob/mcu194.
- Sosa Villalobos, C., Castaneda Chavez, M del R., Amaro Espejo, I.A., Galaviz Villa, I. y Lango Reynoso, F. (2016). Diagnosis of the current state of aquaculture production systems with regard to the environment in Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(2): 193-201. doi: 10.3856/vol44-issue2-fulltext-1.
- Steiner, A.A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2): 134-154. doi: 10.1007/BF01347224.
- Tarango-Arámbula, L.A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2): 17-21.

- Teixeira, M. y Carvalho, I.S. (2009). Effects of salt stress on purslane (*Portulaca oleracea*) nutrition. *Annals of Applied Biology*, 154(1): 77-86. doi: 10.1111/j.1744-7348.2008.00272.x.
- Thomas, R.M., Verma, A.K., Prakash, C., Krishna, H., Prakash, S. y Kumar, A. (2019). Utilization of Inland saline underground water for bio-integration of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and spinach (*Spinacia oleracea*). *Agricultural Water Management*, 222: 154-160. doi: 10.1016/j.agwat.2019.06.001.
- Trejo-Téllez, L.I. y Gómez-Merino, F.C. (2012). *Nutrient solutions for hydroponic systems*. InTech, Rijeka, Croatia. ISBN: 978-953-51-0386-8. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/33765>.
- Troyo-Diéguez, E., Cruz-Falcón, A., Norzagaray-Campos, M., Beltrán-Morales, L.F., Murillo-Amador, B., Beltrán-Morales, F.A., García-Hernández, J.L. y Valdez-Cepeda, R.D. (2010). Agotamiento hidro-agrícola a partir de la Revolución Verde: extracción de agua y gestión de la tecnología de riego en Baja California Sur, México. *Estudios Sociales*, 18(36): 177-201. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-45572010000200008&script=sci_abstract&lng=pt.
- Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (UNCCD). (2011). Desertificación. Una síntesis visual. PNUMA/GRID-Arendal/ Zoi Environment Network. Disponible en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/08/desertificacionunasintesisvisual.pdf>.
- Valencia, E., Adjei, M. y Martin, J. (2001). Aquaculture effluent as a water and nutrient source for hay production in the seasonally dry tropics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8): 1293-1301. doi: 10.1081/CSS-100104113.
- Velázquez-Ibarra, A.M., Covarrubias-Prieto, J., Ramírez-Pimentel, J.G., Aguirre-Mancilla, C.L., Iturriaga de la Fuente, G. y Raya-Pérez, J.C. (2016). Calidad nutrimental de quelites mexicanos. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 4(2): 1-9. Disponible en: <http://somecta.org.mx/Revistas/2016-2/2016-2/CYTAM4-2-1-2016.pdf>.
- Voogt, W. (2002). Potassium management of vegetables under intensive growth conditions. En: *Potassium for Sustainable Crop Production*. Proceedings of the Colloquium of the International Potash Institute. (International Potash Institute: Bern, Switzerland), pp. 347-362.
- Wiangsamut, B. y Koolpluksee, M. (2020). Yield and growth of Pak Choi and Green Oak vegetables grown in substrate plots and hydroponic systems with different plant spacing. *International Journal of Agricultural Technology*, 16(4): 1063-1076.
- Yazici, I., Türkan, I., Sekmen, A.H. y Demiral, T. (2007). Salinity tolerance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) is achieved by enhanced antioxidative system, lower level of lipid peroxidation and proline accumulation. *Environmental and Experimental Botany*, 61(1): 49-57. doi: 10.1016/j.envexpbot.2007.02.010.