

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**  
**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



**ACUAPONÍA E HIDROPONÍA: ESTRATEGIAS SOCIO-ECOLÓGICAS**  
**PARA UNA AGRICULTURA URBANA SOSTENIBLE Y EL**  
**FORTALECIMIENTO COMUNITARIO**

**TESIS**

**Presentada al Instituto de Investigaciones Oceanológicas como requisito parcial**  
**para obtener el grado de:**

**DOCTORA EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

Presenta:

**Nayla Berenice Muñoz Euán**

Directores:

**Dra. Ana De Luca Zuria**

**Dr. Alejandro García Gastelum**

Ensenada, Baja California

Enero, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS  
FACULTAD DE CIENCIAS

“ACUAPONÍA E HIDROPONÍA: ESTRATEGIAS SOCIO-  
ECOLÓGICAS PARA UNA AGRICULTURA URBANA  
SOSTENIBLE Y EL FORTALECIMIENTO COMUNITARIO”

Tesis que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado  
de

**Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo**

Presenta

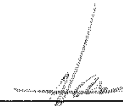
**Nayla Berenice Muñoz Euán**

Aprobada por:



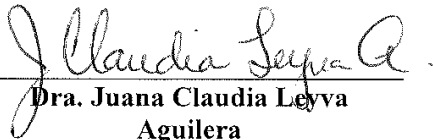
---

**Dra. Ana De Luca Zuria**  
Codirectora



---

**Dr. Alejandro García Gastelum**  
Codirector




---

**Dra. Juana Claudia Leyva**  
Aguilera



---

**Dra. Mariana Villada Canela**



---

**Dr. Misael Rosales Leija**

## RESUMEN

La agricultura urbana emerge como una estrategia prometedora para ofrecer herramientas para enfrentar la escasez de agua, la degradación del suelo, el acceso local de alimentos y la generación de empleo. En este contexto, los sistemas de hidroponía y acuaponía se presentan como técnicas innovadoras de agricultura urbana, en línea al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La acuaponía es un sistema innovador de producción que integra principios biomiméticos, combinando el cultivo de organismos acuáticos y vegetales con un enfoque sostenible. Esta técnica destaca por su capacidad para optimizar recursos, alineándose con los ODS a través de múltiples beneficios ambientales y sociales. Su mecánica de recirculación de agua y nutrientes permite el saneamiento de aguas residuales, reduciendo significativamente la contaminación en ecosistemas acuáticos y terrestres. La diversificación de especies cultivadas en sistemas de acuaponía promueve prácticas sostenibles en la producción de alimentos, generando alternativas más eficientes energéticamente que la producción tradicional de carne. No obstante, su adopción generalizada requiere mayor difusión para facilitar el acceso alimentario, impulsar empleos decentes y contribuir al desarrollo de comunidades urbanas resilientes.

En Ensenada, B.C., México, se realizó un estudio pionero sobre acuaponía utilizando “Aguas Residuales Tratadas de origen doméstico (DW)” comparándola con “Agua dulce (FW)”. En la investigación se diseñaron cuatro tratamientos experimentales: T1 (FW sin nutrientes), T2 (FW con nutrientes), T3 (DW sin nutrientes adicionales) y T4 (DW con nutrientes), empleando girasoles y carpas Koi como organismos de prueba. El análisis comparativo reveló que el tratamiento T4 (DW con nutrientes) mostró beneficios equivalentes al tratamiento T2 (FW con nutrientes), lo que sugiere la viabilidad de las aguas residuales tratadas como alternativa sostenible para sistemas acuapónicos, especialmente en el cultivo de girasoles. No obstante, se recomienda implementar un biofiltro eficiente y continuar estudiando el rendimiento biológico de los peces cultivados en estos sistemas para confirmar la viabilidad de este tipo de cultivos.

Con este fundamento nace el proyecto “Capacitación y Asesoramiento de Sistemas Agrícolas Sostenibles (CASA)” se desarrolló en la colonia "El Veladero", ubicada en Maneadero, Ensenada, Baja California, México. Este proyecto tuvo como objetivo impulsar la agricultura urbana como herramienta para fortalecer a las mujeres y fortalecer la cohesión comunitaria. Para ello, se implementó la elaboración de sistemas hidropónicos utilizando el método Kratky, conocido por su

eficiencia en el uso de recursos y su accesibilidad en contextos de recursos limitados. La iniciativa se destacó por el reciclaje de materiales como botellas de plástico, generando una recepción positiva que sienta las bases para su replicación en otras comunidades.

El proyecto CASA integra de manera innovadora las necesidades individuales y colectivas, con un enfoque de sostenibilidad aplicable a escalas local, regional y global. Para garantizar la continuidad y expansión de estos proyectos, se recomienda que las autoridades locales, gobiernos e instituciones brinden apoyo adicional.

En conclusión, la agricultura urbana, particularmente a través de sistemas como la hidroponía y la acuaponía, emerge como una estrategia transformadora para enfrentar los desafíos actuales de sostenibilidad alimentaria e hídrica. La implementación de estos sistemas no solo representa una solución innovadora para zonas áridas, sino un modelo replicable que integra sostenibilidad ambiental, desarrollo social y eficiencia productiva, contribuyendo a la resiliencia de las comunidades urbanas y rurales ante los desafíos del cambio climático y la creciente demanda alimentaria global.

**Palabras clave:** Agricultura urbana, Objetivos de Desarrollo Sostenible, hidroponía, acuaponía, empoderamiento, escasez de agua.

## ABSTRACT

Urban agriculture is emerging as a promising strategy to offer tools to address water scarcity, soil degradation, local access to food, and job creation. In this context, hydroponic and aquaponic systems are presented as innovative urban agriculture techniques, in line with the fulfillment of the Sustainable Development Goals (SDG).

Aquaponic technology represents an innovative production system that integrates biomimetic principles, combining the cultivation of aquatic organisms and plants with a sustainable approach. This technique stands out for its ability to optimize resources, aligning with the SDGs through multiple environmental and social benefits. Its water and nutrient recirculation mechanism allows for the sanitation of wastewater, significantly reducing pollution in aquatic and terrestrial ecosystems. The diversification of species cultivated in aquaponic systems promotes sustainable practices in food production, generating more energy-efficient alternatives than traditional meat production. However, its widespread adoption requires further dissemination to facilitate food access, promote decent jobs, and contribute to the development of resilient urban communities.

In Ensenada, B.C., México, a pioneering study on aquaponics was conducted using “treated Wastewater from Domestic source (DW)” compared to “Freshwater (FW)”. Four experimental treatments were designed in the research: T1 (FW without nutrients), T2 (FW with nutrients), T3 (DW without additional nutrients) and T4 (DW with nutrients), using sunflowers and Koi carp as test organisms. The comparative analysis revealed that the T4 treatment (DW with nutrients) showed equivalent benefits to the T2 treatment (FW with nutrients), suggesting the viability of treated wastewater as a sustainable alternative for aquaponic systems, especially in sunflower cultivation. However, it is recommended to implement an efficient biofilter and continue studying the biological performance of the fish to ensure the viability of this type of culture.

With this foundation, the project “Capacitación y Asesoramiento de Sistemas Agrícolas Sostenibles (CASA)”, was born, it was developed in the "El Veladero" neighborhood, located in Maneadero, Ensenada, Baja California, Mexico. This project aimed to promote urban agriculture as a tool to empower women and strengthen community cohesion. To do this, the development of hydroponic systems was implemented using the Kratky method, known for its efficiency in the use of resources and its accessibility in contexts with limited resources. The initiative stood out for the recycling of materials such as plastic bottles, generating a positive reception that lays the foundation for its replication in other communities. The CASA project innovatively integrates individual and

collective needs with a sustainability approach applicable at local, regional, and global scales. To ensure the continuity and expansion of these projects, it is recommended that local authorities, governments, and institutions provide additional support.

In conclusion, urban agriculture, particularly through systems such as hydroponics and aquaponics, emerges as a transformative strategy to address the current challenges of food and water sustainability. The implementation of these systems not only represents an innovative solution for arid areas, but a replicable model that integrates environmental sustainability, social development, and productive efficiency, contributing to the resilience of urban and rural communities in the face of the challenges of climate change and the growing global food demand.

**Keywords:** Urban agriculture, Sustainable Development Goals, hydroponics, aquaponics, empowerment, water scarcity.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada (N° de Beca 800609), la cual ha sido fundamental para el desarrollo de mis estudios de doctorado. De igual manera, expresé mi agradecimiento a la Universidad Autónoma de Baja California, al Instituto de Investigaciones Oceanológicas, a la Facultad de Ciencias Marinas y a la Facultad de Ciencias por el apoyo brindado durante mi periodo doctoral.

Agradezco profundamente al Dr. Alejandro García Gastélum, mi director de tesis, por su invaluable apoyo a lo largo de este proceso. Las palabras no alcanzan para expresar mi gratitud por todo lo logrado, tanto en esta tesis como en lo personal. Todo lo aprendido a su lado ha sido fundamental, y estoy convencida de que sus enseñanzas seguirán guiando mi camino profesional. Su confianza en mí, al aceptarme como su estudiante de doctorado, ha sido una fuente constante de motivación y crecimiento como investigadora. Me siento profundamente conmovida y agradecida por todo lo que me ha brindado. Usted será siempre un ejemplo de lo que un investigador debe ser, estoy muy honrada de haber sido su estudiante.

Agradezco a mi directora, la Dra. Ana De Luca, por ampliar mi perspectiva de investigación y motivarme a explorar enfoques sociales e inclusive filosóficos. Aprecio mucho las reuniones en las que, a través del diálogo, fui descubriendo nuevas dimensiones de lo que inicialmente concebía, lo que generó en mí una serie de nuevas preguntas. Gracias a su orientación, ahora tengo una idea más clara sobre el rumbo que tomará mi próxima investigación.

Agradezco enormemente a la Dra. Claudia Leyva por su alegría, cariño y constante apoyo. Estoy muy agradecida por su colaboración en el proyecto CASA, por las plantas donadas, su valiosa guía y su respaldo en las sesiones de este. Soy una gran admiradora de su trabajo y espero poder reflejar, aunque sea en pequeña medida, la alegría que transmite y la pasión que tiene por el trabajo social y ambiental.

Agradezco a la Dra. Mariana Villada por sus valiosos comentarios y su acertada guía a lo largo del proyecto CASA. Su apoyo, así como los detalles que me brindó, han sido fundamentales para la culminación de mi doctorado. Estoy muy agradecida por la oportunidad de haber trabajado con ella y por contar con sus observaciones, las cuales han contribuido significativamente a la mejora de mi tesis.

Agradezco al Dr. Misael Rosales por su valiosa guía y apoyo, especialmente en todo lo relacionado con los sistemas acuapónicos y de recirculación acuícola. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para fortalecer y enriquecer mi tesis de doctorado, proporcionando una base sólida en los aspectos técnicos y teóricos que han sido clave para el desarrollo de este trabajo. Estoy profundamente agradecida por su disposición para compartir su expertise y por la orientación que me ha brindado a lo largo de este proceso.

Agradezco a los investigadores Dr. Leopoldo Mendoza y Dr. Gabriel Correa por los recursos proporcionados para la elaboración del experimento del capítulo III. Su apoyo ha sido clave en el desarrollo de este trabajo, y también les agradezco por ayudarme a descubrir mi capacidad de resiliencia frente a los desafíos.

Agradezco profundamente a los investigadores Dr. Fernando Barreto, Dr. Rafael Bello y Dra. Mónica Hernández por compartir sus valiosos conocimientos y por el tiempo que me brindaron durante mi periodo doctoral. Su orientación ha sido esencial para el desarrollo y enriquecimiento de mi investigación.

Agradezco a la Dra. Cira Montaña, coordinadora de posgrado, por su continuo apoyo a lo largo de este periodo y por su disposición para escucharme siempre. Su acompañamiento ha sido fundamental en este proceso.

Agradezco a Yolanda Navarrete por su invaluable apoyo en la resolución de dudas y por las enriquecedoras y divertidas pláticas que hicieron más ameno este proceso.

Agradezco al M.C. Mauricio Reyes, técnico del IIO, por sus valiosas enseñanzas, su paciencia y por la oportunidad de aprender juntos en los laboratorios de calidad del agua. También quiero expresar mi admiración por su gran fortaleza y excelente actitud tanto ante la vida como en el trabajo, cualidades que han sido una inspiración para mí.

Agradezco a César Jiménez por todo su apoyo durante el experimento que llevamos a cabo, fue un gran aprendizaje de trabajo en equipo.

Agradezco con mucho cariño a las Ingenieras Clarissa Casillas y Ahilyn Borja por todo su apoyo en la elaboración de los sistemas de acuaponía. Realmente aprendí mucho de ambas, y espero que, al menos, hayan podido aprender un poco de lo que sé. Su apoyo fue invaluable y su disposición para enfrentar todo lo que se me ocurría fue fundamental. Gracias por ser un equipo excepcional y por aventurarse conmigo en este proyecto y en todos los proyectos en los que colaboramos.

Agradezco eufóricamente a mi pequeño padawan, Brian Campos, por su disposición y compromiso en todo lo que se me ocurría en cuanto a proyectos. Ha sido una pieza clave en el

desarrollo de mi doctorado, y me siento enormemente agradecida por su apoyo incondicional y por su dedicación en los múltiples proyectos en los que hemos trabajado juntos, así como en los que están por venir. Estoy segura de que serás un gran profesional y me siento afortunada de haber compartido este camino contigo.

Agradezco a Fender por su donación de más de 20 tarimas de madera que fueron utilizadas tanto para la elaboración de los sistemas de hidroponía como para la mejora de la colonia El Veladero, Maneadero, B.C.

Agradezco a Evnika Medina de Jamaak Escuela Verde, por su donación de plantas y por la gran amistad que pudimos entablar.

Agradezco enormemente a Ricardo Bell de Tablitas Rústicas por sus valiosas enseñanzas en carpintería. Su apoyo me permitió sentirme más segura con las herramientas, como el taladro y, especialmente, con mi favorita, la sierra recíproca. Su paciencia y conocimientos fueron fundamentales para que pudiera desarrollar habilidades prácticas y ganar confianza en el trabajo con estas herramientas.

Agradezco profundamente a José Quiroz por compartir sus amplios conocimientos y por la generosa donación de plantas. Todas sus enseñanzas fueron fundamentales para la culminación de mi doctorado, proporcionando un aprendizaje clave que impactó de manera significativa en el desarrollo de mi investigación.

Agradezco al departamento de Ecología y Medio Ambiente del Municipio de Ensenada, en especial al programa de Reciclando Ensenada por su gran apoyo en la donación de materiales para la elaboración de los sistemas de hidroponía del proyecto CASA.

Agradezco con todo el corazón a Patty García, su apoyo fue vital para el desarrollo del proyecto CASA, gracias a ella pude establecer el contacto con la maravillosa comunidad del Veladero.

Agradezco a todas las personas que me donaron plantas y esas bonitas pláticas, pude establecer grandes amistades y descubrir a mi señora de las plantas interior. Muchas gracias a María Luisa Ortiz I. y Juan Manuel Ventura B.; Minerva Uribe; Elizabeth Espinosa Blas y Mariana Espinosa Blas; Arturo Urías; María G. Flores; Gloria Burgoin Peña; Daniel Martínez M.; Jocelyne Montaña G.; María F. Reyes Herrera; Karla J. Vázquez; y muchas más.

Agradezco profundamente a cada una de las chicas del Veladero, no solo por ser la parte fundamental del proyecto CASA, sino también por iluminar mi vida con su energía y dedicación. Gracias por acogerme entre ustedes; son mujeres maravillosas y me siento muy honrada de haber

trabajado con todas. Estoy entusiasmada por seguir colaborando juntas en futuros proyectos. Saben que siempre pueden contar conmigo para lo que necesiten.

Agradezco profundamente a mis queridas amigas que hice en esta hermosa ciudad de Ensenada: a Vania Aguilar, Andrea Mitre, Jean Ávila, Sabrina Pappaterra y a Heccari. En especial, agradezco a Minerva Uribe, quien estuvo a mi lado en todo momento, nunca dejando que me sintiera sola. Gracias por acompañarme en mis cumpleaños, por ser mi cómplice de películas de terror y por ser una presencia constante en mi vida. Mis amigas fueron un pilar fundamental y un punto de equilibrio durante esta etapa profesional.

Agradezco al equipo de Danzatará por fomentar mi crecimiento artístico y equilibrio en mi vida. Mi tiempo dedicado a Danzatará cada semana me ha permitido enfocarme en mí misma y descubrir mi fortaleza física, lo cual ha sido un componente esencial en mi bienestar personal y profesional.

Agradezco a mi madre Dalila, a mi padre Valentín y a mis hermanitas Carla y Yaneth, por brindarme su apoyo incondicional y a pesar de la distancia de península a península siempre estamos en comunicación contándonos muchas cosas, en especial chismecitos, los amo mucho.

Agradezco profundamente a mi esposo, mi amorcito, mi maravilloso compañero, David Rivas, por su amor incondicional, su apoyo constante, su paciencia y por la confianza que siempre ha depositado en mí. Gracias por nuestra vida juntos, por ser ese gran hombre con quien comparto cada momento. Me encanta pasar mi tiempo contigo, disfrutando de nuestra compañía y siendo todo lo que necesitamos el uno al otro. Te agradezco con todo mi corazón, amorcito.

Agradezco mi Luneta, mi perrita, llegaste a mi vida cuando más te necesitaba, has traído tanta alegría a mi vida.

Y por si se me olvida alguien, quiero que sepan que estoy profundamente agradecida con todas las personas que durante este periodo compartieron algún momento conmigo, un detalle o cualquier espacio agradable. Muchas gracias a todos por su apoyo y por contribuir de alguna manera a este proceso. Por último, quiero dejar como recordatorio que pude cumplir mi sueño de realizar mi doctorado, gracias al apoyo de muchas personas maravillosas y, aunque también hubo algunas no tan buenas, cada una de esas experiencias fue fundamental para alcanzar mi meta. Este logro marca el inicio de mi etapa como investigadora, un paso crucial en mi crecimiento profesional y personal.

## ***DEDICATORIA***

*A mi Lucky, te prometí que seríamos grandes científicos.*



Fuiste mi mejor amigo, y nunca podré agradecerte lo suficiente por todo lo que hiciste por mí.

Gracias por estar a mi lado desde el bachillerato hasta buena parte de mi doctorado, acompañándome en los malos y buenos momentos. Te amo, mi Lucky, y siempre llevaré en mi corazón todo lo que compartimos juntos.

## CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	4
3. Justificación y metodología.....	5
3.1 La acuaponía y la Agenda 2030 .....	5
3.2 Aprovechamiento de aguas residuales tratadas domésticas en un sistema de acuaponía 6	6
3.3 Agricultura urbana y empoderamiento femenino, en Maneadero, México.....	7
4. Bibliografía.....	9
CAPÍTULO II: LA ACUAPONÍA Y LA AGENDA 2030 .....	18
Abstract .....	18
CAPÍTULO III: APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS DOMÉSTICAS EN UN SISTEMA DE ACUAPONÍA .....	45
Acuaponía: Agua residual tratada doméstica vs agua dulce, un caso de estudio.....	45
Introducción .....	47
Panorama general del uso de aguas residuales en la agricultura.....	48
Reúso de las aguas residuales en Ensenada, B.C. ....	49
Metodología .....	51
Análisis de la calidad del agua de ingreso y de los tratamientos .....	52
Tratamientos experimentales.....	53
Eficiencia de eliminación de TAN y NH <sub>3</sub> : DW .....	53
Desempeño del crecimiento y desarrollo de los peces.....	54
Análisis de los atributos morfológicos y fisiológicos de las plantas.....	54
Análisis estadístico.....	56
Resultados .....	56
Calidad del agua de ingreso, etapas: preexperimental y experimental .....	56
Calidad del agua de los tratamientos experimentales.....	57
Eficiencia de eliminación de TAN y NH <sub>3</sub> de DW .....	58
Crecimiento y desempeño de peces .....	59
Crecimiento y desarrollo de las plantas.....	59
Discusión.....	62
Calidad del agua.....	62
Rendimiento de la producción de pescado.....	67
Dinámica de producción de plantas .....	68

Conclusiones .....	70
Material suplementario. Solución nutritiva .....	72
Bibliografía.....	73
<b>CAPÍTULO IV: AGRICULTURA URBANA PARA EL FORTALECIMIENTO DE LAS MUJERES EN MANEADERO, MÉXICO .....</b>	<b>84</b>
Introducción .....	86
Transformar la agricultura como clave para alcanzar los ODS .....	89
Agricultura urbana sostenible con perspectiva de género .....	92
Metodología .....	93
A. Área de estudio.....	94
B. Operación del proyecto CASA.....	95
Fase B.1: Acercamiento e integración a la comunidad .....	96
Fase B.2: Obtención de las características y condiciones sociales .....	96
Fase B.3: Capacitación y desarrollo de conceptos .....	98
Fase B.4: Asesoramiento y codiseño de sistemas agrícolas sostenibles .....	98
Fase B.5: Evaluación final .....	100
C. Análisis e interpretación de datos.....	100
Resultados y discusiones.....	101
Análisis descriptivo de los factores socioeconómicos y experiencias previas de las participantes que implementaron un sistema agrícola sostenible .....	101
Acerca de la colonia y sus necesidades.....	102
Motivaciones en la participación de actividades y talleres, incluido el proyecto CASA.....	102
Percepción de las participantes durante el proyecto (Entrevista final) .....	104
Contribución del Proyecto CASA y su relación a los ODS .....	106
Involucramiento y necesidades .....	110
Conclusiones .....	112
Bibliografía.....	113
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>124</b>
Conclusiones .....	124
Recomendaciones generales:.....	125

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

Esta tesis está estructurada en cinco capítulos, cada uno de ellos diseñado para abordar aspectos fundamentales de la agricultura urbana sostenible con sus herramientas principales como los sistemas hidropónicos y acuapónicos, explorando su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con un enfoque particular en el fortalecimiento comunitario y la reutilización de recursos en contextos urbanos. A continuación, se describe brevemente el contenido y propósito de cada capítulo.

**Capítulo I. Introducción general.** En este capítulo se introduce al tema central de la tesis: la implementación de sistemas de agricultura sostenible en un contexto urbano y su potencial para abordar problemas ambientales y sociales, exponiendo de manera detallada el problema que aborda este estudio, así como proporcionar antecedentes de los sistemas de agricultura sostenible y lo relacionado a los ODS. Se analizarán los principales enfoques, desafíos y los avances recientes en la implementación de estos sistemas, con el fin de establecer un marco conceptual claro para el desarrollo de la investigación.

**Capítulo II. Contribución de los sistemas acuapónicos para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible de la Agenda 2030.** Se explora el potencial de los sistemas acuapónicos como una herramienta eficaz para contribuir al cumplimiento de los ODS establecidos en la Agenda 2030. Esta propuesta se fundamenta en los resultados de una revisión bibliográfica sistemática, que examina la viabilidad de los sistemas acuapónicos para promover la sostenibilidad en distintos contextos.

**Capítulo III. Aprovechamiento de aguas residuales tratadas domésticas en un sistema de acuaponía.** Se enfoca en una aplicación específica de los sistemas acuapónicos: el aprovechamiento de aguas residuales tratadas domésticas como una fuente de agua alternativa para cultivos. Este capítulo detalla un experimento realizado en el que se evalúa la viabilidad de utilizar aguas residuales tratadas para alimentar un sistema acuapónico, con el objetivo de cultivar especies ornamentales. A través de este estudio, se examina cómo la reutilización de aguas residuales tratadas puede representar una solución eficaz en contextos de escasez de agua, sin comprometer la calidad de los cultivos ni la salud humana. Se presentan los resultados del experimento, así como un análisis

detallado de los beneficios y limitaciones de este enfoque, basado en la comparación con sistemas tradicionales de riego.

**Capítulo IV. Agricultura urbana para el fortalecimiento de las mujeres en Maneadero, B.C., México.** Aborda la agricultura urbana como una herramienta clave para promover y fortalecer el empoderamiento de las mujeres y la comunidad. Con un enfoque particular en el caso de Maneadero, Baja California, México. Se propone un espacio donde las mujeres puedan debatir y desarrollar estrategias comunitarias colaborativas. Mediante la implementación de sistemas hidropónicos basados en el método Kratky, se logró incorporar la reutilización de materiales y demostrar una alta aceptación de estos proyectos por parte de la comunidad. Este enfoque proporciona un modelo base que puede ser replicado o adaptado para su aplicación en contextos locales y regionales, con especial relevancia en zonas afectadas por la escasez de agua.

**Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.** El último capítulo de la tesis presenta las conclusiones generales derivadas de los capítulos anteriores, integrando los hallazgos sobre el impacto de los sistemas acuapónicos, el aprovechamiento de aguas residuales tratadas, y el fortalecimiento femenino individual o comunitario a través de la agricultura urbana. Se destaca la agricultura urbana, en especial mediante acuaponía e hidroponía, como una herramienta clave para abordar problemas ambientales y sociales, promoviendo el cumplimiento de los ODS, la seguridad alimentaria, la eficiencia en el uso del agua y el fortalecimiento hacia el empoderamiento comunitario, particularmente de las mujeres.

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1. Introducción

El agua dulce es un recurso esencial para los procesos biológicos, el desarrollo humano y la sostenibilidad de los sistemas alimentarios, pero su carácter finito y la creciente demanda representan desafíos críticos. La agricultura es la actividad que más demanda agua, representando aproximadamente el 70% de las extracciones globales de agua dulce y alcanzando hasta el 80% en países en desarrollo (Li et al., 2020; FAO, 2023). En regiones áridas y semiáridas, la demanda para actividades agrícolas puede ser aún mayor, alcanzando hasta un 85% de las extracciones de agua (Zimmermann & Fischer, 2020). Esta alta dependencia genera una presión significativa sobre los recursos hídricos, exacerbada por la pérdida de calidad del agua y su escasez, lo que compromete la sostenibilidad agrícola y la seguridad alimentaria (Li et al., 2020; FAO, 2019).

No obstante, la crisis hídrica combinada con la creciente demanda de alimentos y las políticas deliberadas que perpetúan la exclusión social, han generado impactos profundos en los sistemas alimentarios globales. Entre las consecuencias más visibles se encuentran los desiertos alimentarios, caracterizados por su localización en áreas económicamente vulnerables con acceso limitado a productos alimenticios, resultado de una distribución ineficiente (Ramos, 2015 a; Ramos, 2015 b; Colson-Fearon & Versey, 2022). Este fenómeno refleja la falta de disponibilidad y acceso equitativo a los alimentos, una problemática que define los sistemas productivos contemporáneos, por ejemplo, en poblaciones rurales de América (Ramos 2015 a).

Ante ello, la urbanización actúa como un factor agravante al fomentar la migración desde zonas rurales hacia urbanas y al transformar el uso del suelo, desplazando actividades agrícolas para dar lugar a asentamientos urbanos (Pribadi & Pauleit, 2015; Skar et al., 2020). Esta expansión urbana constituye uno de los principales motores de cambio en la cobertura y uso del suelo a nivel mundial (Liu et al., 2017).

En este contexto, la agricultura urbana o periurbana surge como una alternativa a los desafíos actuales, contribuyendo a la seguridad alimentaria, reduciendo la presión sobre los recursos y promoviendo el desarrollo económico local (Orsini et al., 2013; Bennedetti et al., 2023; Mietz et al., 2024). Además, mejora la cohesión social, la salud pública y ayuda a reducir la pobreza al crear oportunidades económicas (Hovorka, 2006; Battersby & Marshak, 2013; Whittinghill & Sarr, 2021).

Entre las estrategias más comunes de la agricultura urbana se incluyen el compostaje, la plasticultura, la acuicultura, los techos verdes, las granjas en azoteas, mientras en la categoría,

considerada sin suelo las principales son: hidroponía, aeroponía y acuaponía (Goldstein et al., 2016; Cerozi et al., 2022; Whittinghill & Sarr, 2022).

La hidroponía es un sistema de producción de plantas ornamentales y comestibles que utiliza una solución nutritiva y prescinde del suelo, lo que permite un ahorro significativo de agua y un uso más eficiente de este recurso (Pritsa et al., 2008; Haddad & Mizyed, 2011). La aeroponía, por su parte, es una variante de la hidroponía en la que las raíces de las plantas están suspendidas en el aire y se riegan mediante rociadores que aplican la solución nutritiva directamente sobre ellas (Pantarella, 2018; Gumisiriza et al., 2022). La acuaponía combina las ventajas de la acuicultura y la hidroponía, y logra el reciclaje de los desechos de los peces como nutrientes para las plantas, optimizar el uso de recursos naturales y promover una simbiosis beneficiosa entre los organismos cultivados y las bacterias nitrificantes (Goddek et al., 2015; Abusin & Mandikiana, 2020; Cammies et al., 2021). Estas tecnologías no solo abordan problemas como la escasez de agua y la degradación del suelo, sino que también fortalecen la resiliencia frente al cambio climático y otras crisis globales.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, se ha demostrado que la agricultura urbana y sus técnicas asociadas desempeñan un papel fundamental en la consecución de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), tales como: 1- Fin de la pobreza, 2 - Hambre cero, 5 – Igualdad de género, 6 - Agua limpia y saneamiento, 8 - Trabajo decente y crecimiento económico; 12 - Producción y consumos responsables y 13 - Acción por el clima (Benedetti et al., 2023; Mietz et al., 2024; Muñoz-Euan et al., 2024). Sin embargo, persisten desafíos relacionados con las posibles incompatibilidades entre ciertos objetivos. Un caso destacado, es el del ODS 8, específicamente en la meta 8.1, que promueve un crecimiento anual del producto interno bruto (PIB) de al menos el 7%. Este enfoque entra en diferencias con los ODS relacionados a la salud, como el 3 – Salud y bienestar, o bien considerando el cuidado del medio ambiente y sus recursos, como el ODS 12 y 13, ya que se ha argumentado que el crecimiento no es sostenible ya que tiende a fomentar patrones de consumo intensivo de recursos y contribuyendo a la degradación ambiental (Bengtsson et al., 2018; Hangoma & Surgey, 2019; Hickey, 2019).

Asimismo, algunas estrategias que evidencian la incompatibilidad entre ciertos ODS incluyen, por ejemplo, políticas como los impuestos sobre el consumo de azúcar, diseñadas para promover una alimentación más saludable en línea con el ODS 3, y tienen implicaciones económicas al reducir la demanda y, con ello, la cadena de valor de su producción (Hangoma & Surgey, 2019). Esto genera tensiones al disminuir el crecimiento económico impulsado por este sector (Hangoma & Surgey, 2019). De forma similar, garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles (meta 12.2)

exige desvincular el crecimiento económico de la explotación intensiva de recursos naturales. En este sentido, se ha propuesto desarrollar indicadores alternativos que midan el desarrollo humano en términos de reducción de pobreza, acceso a educación, mejoras en salud y generación de empleo digno, en lugar de centrarse exclusivamente en el PIB (Bengtsson et al., 2018; Hangoma & Surgey, 2019; Hickey, 2019).

La igualdad de género (ODS 5) presenta también retos significativos. Actualmente, solo el 15.4 % de los indicadores relacionados con este objetivo muestran un progreso satisfactorio (ONU, 2023). Las mujeres y niñas representan la mitad del potencial mundial, pero su contribución continúa viéndose limitada por las barreras estructurales que perpetúan la desigualdad (UN, 2018). Reducir estas desigualdades y promover el empoderamiento femenino ha demostrado ser una estrategia efectiva para fortalecer la resiliencia climática (Seymour, 2017; Bryan et al., 2024). El conocimiento y las capacidades de las mujeres para responder a los impactos climáticos resultan esenciales, ya que su participación activa contribuye a mitigar los efectos negativos del cambio climático en áreas críticas como el hambre y la seguridad alimentaria (Seymour, 2017; Huyer & Partey, 2019; Bryan et al., 2024). Dentro de los sistemas agroalimentarios, las mujeres desempeñan roles fundamentales, asumiendo diversas responsabilidades que son clave para la subsistencia y el bienestar de sus comunidades (Alkire et al., 2013; Bryan et al., 2024).

En América latina y el Caribe representan hasta el 36%, donde la desigualdad de género perjudica la seguridad alimentaria y el crecimiento (FAO, 2014; FAO, 2023). En Mexico, representan alrededor del 34% de la fuerza laboral agrícola (UNDP, 2023). No obstante, los roles de género siguen estando marcadamente sesgados, asignando a las mujeres la responsabilidad principal del cuidado del hogar y la crianza de los hijos, lo que limita su participación plena y equitativa en actividades productivas (Guendelman, et al., 2001; UNDP, 2023). Se han visto esfuerzos para visibilizar y reconocer la igualdad de derechos de las mujeres, sin embargo, siempre considerando el cuidado del hogar y de la familia, esto a través de la agricultura urbana ha sido una opción viable (Guendelman, et al., 2001; FAO, 2008; Dieleman, 2017). Este enfoque no solo fomenta el empoderamiento de las mujeres tanto a nivel individual como colectivo (en dimensiones sociales, económicas, físicas y psicológicas), sino que también contribuye a reducir el hambre, estimular la economía y fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a crisis globales, tales como el cambio climático o pandemias, como la reciente por COVID-19 (Hovorka, 2006; Slater, 2001; Hando & Legesse, 2022).

El presente estudio adopta un enfoque interdisciplinario que integra los principios de economía circular, agricultura sostenible, uso eficiente de los recursos y fortalecimiento del rol femenino. Estos pilares se presentan como fundamentales para desarrollar sistemas agrícolas más resilientes, equitativos y alineados con los ODS. La economía circular, en particular, emerge como una herramienta clave al promover modelos de producción que maximizan el aprovechamiento de los recursos y minimizan los desechos, contribuyendo directamente al cumplimiento de los ODS (Bengtsson et al., 2018; Valverde & Avilés-Palacios, 2021). Con la Agenda 2030 como marco orientador, se propone impulsar la agricultura urbana con un enfoque en técnicas innovadoras sin suelo, como la hidroponía y la acuaponía. Con el objetivo de aprovechar su enfoque integral que no solo responde a los desafíos actuales, como la crisis ambiental y la seguridad alimentaria, sino que también contribuye al empoderamiento de las mujeres, fortaleciendo su papel en la construcción de comunidades.

## **2. Objetivos**

- 1) Evaluar la relevancia de la acuaponía en el cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.
- 2) Analizar el uso de dos tipos de agua, Aguas Residuales Tratadas de origen doméstico (DW)” y “Agua dulce (FW), en el cultivo de acuaponía ornamental.
- 3) Dar herramientas para promover el empoderamiento femenino comunitario mediante un proceso interdisciplinario que incentive la participación activa de las mujeres, a partir de la capacitación y asesoramiento de técnicas sostenibles de agricultura urbana.

### **3. Justificación y metodología**

#### ***3.1 La acuaponía y la Agenda 2030***

La agricultura convencional genera impactos negativos como el uso ineficiente de agua, alta demanda de tierras fértiles, elevado consumo de fertilizantes y la degradación de la superficie terrestre (Li et al., 2018; Abusin & Mandikiana, 2020; Bich et al., 2020). Estos efectos se han intensificado debido al aumento de la población y la creciente demanda de productos agrícolas, lo que hace urgente la transición hacia sistemas más sostenibles. En este contexto, la acuaponía, un sistema que se utiliza en la agricultura urbana, combina la producción de peces y plantas y ha ganado popularidad por su capacidad para optimizar el uso del agua y aprovechar los residuos de los cultivos (Goddek et al., 2015; Tomlinson, 2017; Sarfraz, 2020). La acuaponía maximiza la eficiencia de los recursos, lo que la convierte en una alternativa sostenible que permite integrar los beneficios de la agricultura urbana (Martínez, 2013; Abusin & Mandikiana, 2020; Diehl & Kaur, 2021). No obstante, se hizo necesario destacar sus contribuciones a la sostenibilidad, particularmente en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, lo que motivó una revisión sistemática sobre su impacto.

La revisión se llevó a cabo mediante un muestreo de conveniencia, utilizando palabras claves seleccionadas por el grupo de investigación y aplicando criterios de inclusión y exclusión. Las publicaciones científicas se ordenaron inicialmente por relevancia, priorizando aquellas en revistas arbitradas, debido a que pasan por un proceso de revisión por pares, lo cual garantiza la confiabilidad de la información (Darko & Chan, 2017). También se incluyeron documentos de organizaciones oficiales, como la ONU y la FAO. Se considerarán estudios publicados hasta el año 2022 y, como límite inferior, publicaciones del año 2000, ya que fue el año en que líderes mundiales firmaron la Declaración del Milenio de las Naciones Unidas, donde se derivaron los Objetivos del Desarrollo del Milenio, precursores de los ODS.

La originalidad de este estudio radicó en identificar y analizar investigaciones que hayan explorado o aplicado sistemas acuapónicos, evaluando su contribución, directa o indirecta, al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los resultados se presentan en el capítulo II de forma descriptiva, marcando los resultados en relación con cada ODS y agrupando aquellos que se apoyan mutuamente para el cumplimiento de sus metas.

### **3.2 Aprovechamiento de aguas residuales tratadas domésticas en un sistema de acuaponía**

Los resultados positivos del uso de aguas residuales en sistemas hidropónicos (Haddad & Mizyed, 2011; Da Silva et al., 2018; Souza et al., 2018; Ndulini et al., 2018) y acuícolas (Adhikari et al., 2009; Saidi et al., 2012; Kumar et al., 2014; Kumar et al., 2015), así como en cultivos agrícolas en regiones como Ensenada (Mendoza-Espinosa et al., 2004; Mendoza-Espinosa et al., 2008; Acosta-Zamorano et al., 2013; Mendoza-Espinosa & Daesslé, 2018), destacan la viabilidad de integrar la acuaponía como una solución que maximiza estas ventajas. Este enfoque no solo permite aprovechar las “Aguas Residuales Tratadas (ART)” en la agricultura, sino que también es viable ambiental y económicamente (Medellín-Azuara et al., 2007; Waller-Barrera et al., 2009; Elizondo & Mendoza-Espinosa, 2020).

No obstante, en un estudio reciente de Cifuentes (2022) se demostró la viabilidad del uso de ART de la “Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)” del Sauzal en sistemas hidropónicos para la producción de girasol (*H. annuus*) y Snapdragon (*A. majus*), validando su potencial en la agricultura urbana y sistemas sostenibles. Para garantizar la seguridad de la salud humana, una estrategia inicial en acuaponía es emplear especies ornamentales, que presentan menor riesgo sanitario (Saidi et al., 2012).

Considerando el resguardo de la salud humana, una aproximación idónea para el aprovechamiento de las aguas residuales en un sistema acuapónico se propuso optar en primera instancia especies ornamentales de interés comercial (Saidi et al., 2012). Para ello en esta investigación que se describe a detalle en el capítulo III se propuso el uso de dos tipos de agua, “Aguas Residuales Tratadas de origen doméstico (DW)” y “Agua dulce (FW), en un cultivo de acuaponía ornamental, con variaciones con respecto a la adición de nutrientes, resultando con ello cuatro tratamientos diferentes.

### ***3.3 Agricultura urbana y empoderamiento femenino, en Maneadero, México***

El proceso de urbanización avanza globalmente y, en México, en 2020, se registró que al menos el 79% de la población residía en áreas urbanas, con una proyección de aumento al 83.2% para 2030, destacándose que la mayoría de este crecimiento estará compuesto por población en situación de pobreza (SEMARNAT, 2021; SEDATU, 2023).

Esta tendencia, es característica de muchos países en desarrollo como México y ocurre principalmente en tierras agrícolas, lo que genera riesgos significativos para la seguridad alimentaria (Seto et al., 2011; Wang et al., 2021). En este contexto, es crucial reconocer que las intervenciones en sistemas agroalimentarios deben integrar una perspectiva de género, ya que, de lo contrario, podrían exacerbar las desigualdades, como el aumento de la carga laboral de las mujeres, su pobreza de tiempo o su limitación de acceso a ingresos y activos (Huyer & Partey, 2020; Bryan et al., 2024). La agricultura urbana ha surgido como una estrategia clave no solo para enfrentar los retos asociados a la urbanización, sino también para promover un cambio transformador hacia la igualdad de género.

En este contexto, la agricultura urbana ha sido propuesta como una herramienta estratégica para promover la equidad de género y brindar apoyo a grupos desfavorecidos (Dieleman, 2017; Moreno-Gaytán et al., 2019). Una de las claves para su alcance es dar herramientas a las mujeres en esta área, donde ya ha habido esfuerzos para liderar ejemplos de agricultura urbana, pues a nivel mundial, alrededor del 65% de los agricultores urbanos son mujeres (Hovorka, 2006; Orsini et al., 2013; FAO, 2016).

En México, la agricultura urbana ha promovido el empoderamiento personal y comunitario, orientándose hacia la sostenibilidad y la mejora de la seguridad alimentaria en áreas urbanas, al tiempo que fomenta el intercambio de conocimientos dentro de la comunidad (Moreno-Gaytán et al., 2019; Moreno, 2022; Montejo et al., 2023).

Las motivaciones de las mujeres para participar en estas actividades incluyen la producción de alimentos e ingresos, la mejora de su salud y la reducción de la pobreza a través del aumento en el cultivo y consumo de frutas y verduras (Trauger et al., 2010; Orsini et al., 2013). Además, estas iniciativas fortalecen los vínculos entre comunidades rurales y urbanas, les permiten dedicar más tiempo al cuidado de sus hijos, lo que mejora indirectamente su nutrición, y les brindan herramientas para tomar mayor control sobre sus vidas, avanzando hacia la independencia financiera y el empoderamiento personal (Orsini et al., 2013; Poulsen et al., 2016).

En la Península de Baja California, donde la urbanización ha impactado áreas agrícolas clave como Rodolfo Sánchez Taboada (Maneadero) y ha incrementado la migración regional (Garduño et

al., 2011; Lázaro, 2023), existen colonias periféricas, como "El Veladero", que presentan escasez de servicios y están alejadas de las áreas urbanas consolidadas (Aguirre, 2016; Conavi, 2018; Aguilar et al., 2022). Con el fin de dar herramientas para el proceso de empoderamiento de las mujeres en su comunidad y la participación activa de las mujeres en prácticas sostenibles, el proyecto "Capacitación y Asesoramiento de Sistemas Agrícolas Sostenibles" (CASA) se implementó a principios de 2024, bajo un enfoque de Investigación-Acción Participativa (IAP) (Cornish et al., 2023), esto se abordará a detalle en el capítulo IV. Este proyecto se diseñó para apoyar a grupos vulnerables y promover la protección ambiental, el uso eficiente de recursos naturales y la seguridad alimentaria, considerando la agricultura urbana como una herramienta central para el desarrollo sostenible y la cohesión social. La inclusión de las mujeres en la toma de decisiones locales sobre agua y agricultura requiere enfoques integrales que eliminen las barreras estructurales que han limitado su participación. Estrategias clave incluyen la creación de espacios participativos inclusivos donde las mujeres tengan voz activa, capacitación y acceso a recursos como tierra y financiamiento para fortalecer su liderazgo, implementación de políticas públicas con perspectiva de género que promuevan su representación y programas de apoyo, así como la formación de redes comunitarias que impulsan el intercambio de conocimientos y su influencia en la toma de decisiones.

Este proyecto contó con la participación activa de aproximadamente veinte mujeres, quienes, trabajando en equipo, implementaron dos sistemas de agricultura sostenible utilizando el método hidropónico Kratky. Además, nueve de ellas llevaron a cabo el diseño, construcción e instalación de sus propios sistemas hidropónicos en sus hogares, demostrando habilidades técnicas e innovación. Este grupo se ha destacado por su participación constante, creatividad y cohesión, consolidándose como un modelo ejemplar dentro de su comunidad. Su colonia se ha convertido en un referente para otras localidades cercanas, promoviendo la integración de más personas de la comunidad con el objetivo de fortalecer la red de apoyo y ampliar el impacto del proyecto.

#### 4. Bibliografía

- Abusin, S.A.A. & Mandikiana, B.W. (2020). Towards sustainable food production systems in Qatar: assessment of the viability of aquaponics. *Glob. Food Secur.* 25, 100349. doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100349
- Acosta-Zamorano, Dinora, Macías-Carranza, Víctor, Mendoza-Espinosa, Leopoldo, y Cabello-Pasini, Alejandro. (2013). Efecto del agua residual tratada sobre la composición química de Uva Tempranillo (*Vitis vinifera*) en Baja California, México. *Agrociencia*, 47(8), 767-779.
- Adhikari, R., Rauniyar, S., Pokhrel, N., Wagle, A., Komai, T., & Paudel, S. R. (2020). Nitrogen recovery via aquaponics in Nepal: current status, prospects, and challenges. *SN Applied Sciences*, 2, 1-15.
- Adhikari, S., Ghosh, L., Rai, S. P., & Ayyappan, S. (2009). Metal concentrations in water, sediment, and fish from sewage-fed aquaculture ponds of Kolkata, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159, 217-230.
- Aguilar, A. G., Flores, M. A., & Lara, L. F. (2022). Peri-urbanization and land use fragmentation in Mexico City. Informality, environmental deterioration, and ineffective urban policy. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 790474.
- Aguirre R., E. (2016). espacio público residencial en baja california. la construcción social de lo urbano entre lo informal y lo institucional. *Aproximaciones a la historia del urbanismo popular: Una mirada desde México*. (ed. Quiróz Rothe, H.) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alkire, S., Meinzen-Dick, R., Peterman, A., Quisumbing, A., Seymour, G., & Vaz, A. (2013). The women's empowerment in agriculture index. *World development*, 52, 71-91.
- Battersby, J., & Marshak, M. (2013). Growing communities: Integrating the social and economic benefits of urban agriculture in Cape Town. In *Urban Forum*. 24, 447-461. Springer Netherlands.
- Bengtsson, M., Alfredsson, E., Cohen, M., Lorek, S., & Schroeder, P. (2018). Transforming systems of consumption and production for achieving the sustainable development goals: Moving beyond efficiency. *Sustainability science*, 13, 1533-1547.
- Benedetti, L. V., de Almeida Sinisgalli, P. A., Ferreira, M. L., & Lemes de Oliveira, F. (2023). Challenges to promote sustainability in urban agriculture models: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2110.

- Bich, T.T.N., Yi-Ching, C., Tri, D.Q. & Khoa, H. D. (2020). Applied aquaponics to culture high value local species and ultimately reused and recycle the local materials to build the green and sustainable agriculture. International Conference on Resources and Environmental Research 2019. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 432 (2020) 012008 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/432/1/012008.
- Bryan, E., Alvi, M., Huyer, S., & Ringler, C. (2024). Addressing gender inequalities and strengthening women's agency to create more climate-resilient and sustainable food systems. *Global Food Security*, 40, 100731.
- Cammies, C., Mytton, D., Crichton, R. (2021). Exploring economic and legal barriers to commercial aquaponics in the EU through the lens of the UK and policy proposals to address them. *Aquaculture International*. 29(3), 1245-1263. doi.org/10.1007/s10499-021-00690-w.
- Cerozi, B. S., Arlotta, C. G., & Richardson, M. L. (2022). Fish effluent as a source of water and nutrients for sustainable urban agriculture. *Agriculture*, 12(12), 1975.
- Cifuentes Torres, ML (2022). *Reuso de Agua Residual tratada como fuente de nutrientes para el crecimiento de flores de interés comercial en Sistemas Hidropónicos* (p. 180). Tesis de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Autónoma de Baja California.
- Colson-Fearon, B., & Versey, H. S. (2022). Urban agriculture as a means to food sovereignty? A case study of Baltimore city residents. *International journal of environmental research and public health*, 19(19), 12752.
- Comisión Nacional de Vivienda (Conavi). (2018). MODELO GEOESTADÍSTICO PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE CONTENCIÓN URBANA 2018. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/333659/Modelo\\_Geostadistico\\_Perimetros\\_de\\_Contencion\\_Urbana\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/333659/Modelo_Geostadistico_Perimetros_de_Contencion_Urbana_2018.pdf) Acceso el 05 de junio de 2024.
- Cornish, F., Breton, N., Moreno-Tabarez, U., Delgado, J., Rua, M., de-Graft Aikins, A., & Hodgetts, D. (2023). Participatory action research. *Nature Reviews Methods Primers*, 3(1), 34.
- Da Silva Cuba Carvalho, R., Bastos, R.G. & Souza, C.F. (2018). Influence of the use of wastewater on nutrient absorption and production of lettuce grown in a hydroponic system. *Agricultural Water Management*, 203, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.028>.
- Darko, A. & Chan, A. P. C. (2017). Review of barriers to green building adoption. *Sustain. Dev.* 25(3), 167-179. doi.org/10.1002/sd.1651

- Diehl, J.A. & Kaur, H. (2021). Introduction: New Forms of Urban Agriculture Embedded in Urban Resources—Where Is the Evidence?. In: Diehl, J.A., Kaur, H. (eds) *New Forms of Urban Agriculture: An Urban Ecology Perspective*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3738-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3738-4_1)
- Dieleman, H. (2017). Urban agriculture in Mexico City; balancing between ecological, economic, social and symbolic value. *Journal of Cleaner Production*, 163, S156-S163.
- Elizondo, L. S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2020). An analysis of water scarcity in a drought prone city: The case of Ensenada, Baja California, Mexico/Un análisis de la escasez de agua en una ciudad sujeta a sequías: el caso de la ciudad de Ensenada, Baja California, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 01-55.
- Filmon, H. H., & Mitke, A. L. (2022). Impact of program-based sustainable urban agricultural intervention on women empowerment in Addis Ababa: Evidence from women empowerment in agriculture index analysis. *African Journal of Agricultural Research*, 18(5), 308-321.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (20 de marzo de 2019). Water Scarcity – One of the greatest challenges of our time. Disponible en: [www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1185405/](http://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1185405/). Acceso el 01 de agosto de 2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2016). Urban agriculture in the Gaza Strip through vertical gardens and aquaponics. Disponible en: [www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/Fact\\_sheet\\_on\\_aquaponics\\_Final.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/Fact_sheet_on_aquaponics_Final.pdf). Acceso el 14 de enero de 2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (13 de abril de 2023). Nuevo informe FAO: La igualdad de las mujeres en los sistemas agroalimentarios podría acabar con la inseguridad alimentaria de 45 millones de personas. Disponible en: <https://www.fao.org/americas/news/news-detail/Nuevo-informe-FAO-La-igualdad-de-las-mujeres-en-los-sistemas-agroalimentarios-podr%C3%ADa-acabar-con-la-inseguridad-alimentaria-de-45-millones-de-personas/es> Acceso el 15 de agosto de 2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (20 de octubre de 2014). La desigualdad de género perjudica la seguridad alimentaria y el crecimiento. Disponible en: <https://www.fao.org/in-action/territorios-inteligentes/noticias/detalle/en/c/261346/> Acceso el 01 de agosto de 2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2008). *Urban Agriculture For Sustainable Poverty Alleviation and Food Security*. Disponible en:

[https://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/UPA\\_-WBpaper-Final\\_October\\_2008.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/UPA_-WBpaper-Final_October_2008.pdf). Acceso el 12 de junio de 2024.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). “Water scarcity means less water for agriculture production which in turn means less food available, threatening food security and nutrition”. Disponible en: <https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/en>. Acceso el 31 de octubre de 2024.
- Garduño, E., Navarro, A., Ovalle, P., & Mata, C. (2011). Caracterización socioeconómica y cultural de las mujeres indígenas migrantes en los valles de Maneadero y San Quintín, Baja California, México. *Boletín de Antropología Universidad de Antioquia*, 25(42), 57-83.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H. & Thorarinsdottir, R., (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*. 7(4), 4199-4224. doi:10.3390/su7044199.
- Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J., & Birkved, M. (2016). Urban versus conventional agriculture, taxonomy of resource profiles: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-19.
- Guendelman, S., Malin, C., Herr-Harthorn, B., & Vargas, P. N. (2001). Orientations to motherhood and male partner support among women in Mexico and Mexican-origin women in the United States. *Social science & medicine*, 52(12), 1805-1813.
- Gumisiriza, M. S., Kabirizi, J. M., Mugerwa, M., Ndakidemi, P. A., & Mbega, E. R. (2022). Can soilless farming feed urban East Africa? An assessment of the benefits and challenges of hydroponics in Uganda and Tanzania. *Environmental Challenges*, 6, 100413.
- Haddad, M. & Mized, N. (2011). Evaluation of various hydroponic techniques as decentralised wastewater treatment and reuse systems, *International Journal of Environmental Studies*, 68:4, 461-476, DOI: 10.1080/00207233.2011.582701
- Hando H., F. & Leggesse A., M. (2022). Impact of program-based sustainable urban agricultural intervention on women empowerment in Addis Ababa: Evidence from women empowerment in agriculture index analysis. *African Journal of Agricultural Research*, 18(5), 308-321.
- Hangoma, P., & Surgey, G. (2019). Contradictions within the SDGs: are sin taxes for health improvement at odds with employment and economic growth in Zambia. *Globalization and Health*, 15, 1-9.

- Hickel, J. (2019). The contradiction of the sustainable development goals: Growth versus ecology on a finite planet. *Sustainable Development*, 27(5), 873-884.
- Hovorka, A. J. (2006). Urban agriculture: addressing practical and strategic gender needs. *Development in Practice*, 16(1), 51-61.
- Huyer, S., & Partey, S. (2020). Weathering the storm or storming the norms? Moving gender equality forward in climate-resilient agriculture: Introduction to the Special Issue on Gender Equality in Climate-Smart Agriculture: Approaches and Opportunities. *Climatic Change*, 158(1), 1-12.
- Kumar, D., Chaturvedi, M. K., Sharma, S. K., & Asolekar, S. R. (2015). Sewage-fed aquaculture: a sustainable approach for wastewater treatment and reuse. *Environmental monitoring and assessment*, 187(10), 1-10.
- Kumar, D., Hiremath, A. M., & Asolekar, S. R. (2014). Integrated management of wastewater through sewage fed aquaculture for resource recovery and reuse of treated effluent: a case study. *Apcee Procedia*, 10, 74-78.
- Langemeyer, J., Madrid-Lopez, C., Beltran, A. M., & Mendez, G. V. (2021). Urban agriculture—A necessary pathway towards urban resilience and global sustainability?. *Landscape and Urban Planning*, 210, 104055.
- Lázaro, E. (2023). Estimation of the willingness to pay in two aquifers in Baja California, Mexico. Estimación de la disponibilidad a pagar en dos acuíferos en Baja California, México. DOI: 10.24850/j-tyca-16-2-4
- Li, C., Lee, C. T., Gao, Y., Hashim, H., Zhang, X., Wu, W. M. & Zhang, Z. (2018). Prospect of aquaponics for the sustainable development of food production in urban. *Chem. Eng. Trans.* 63, 475-480.
- Li, J., Fei, L., Li, S., Xue, C., Shi, Z., & Hinkelmann, R. (2020). Development of “water-suitable” agriculture based on a statistical analysis of factors affecting irrigation water demand. *Science of The Total Environment*, 744, 140986.
- Liu, Y., Yang, Y., Li, Y., & Li, J. (2017). Conversion from rural settlements and arable land under rapid urbanization in Beijing during 1985–2010. *Journal of Rural Studies*, 51, 141-150.
- Martínez, Y. R. (2013). La Acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿Una posibilidad para tener en casa? *REDICINySA*. 2(5):16-23
- Martínez, Y. R. 2013. La Acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿Una posibilidad para tener en casa? *REDICINySA*. 2(5):16-23

- Medellín-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., & Ramírez-Acosta, R. J. (2007). The application of economic-engineering optimisation for water management in Ensenada, Baja California, Mexico. *Water science and technology*, 55(1-2), 339-347.
- Mendoza-Espinosa, L. G., & Daesslé, L. W. (2018). Consolidating the use of reclaimed water for irrigation and infiltration in a semi-arid agricultural valley in Mexico: Water management experiences and results. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 8(4), 679-687.
- Mendoza-Espinosa, L. G., Cabello-Pasini, A., Macias-Carranza, V., Daessle-Heuser, W., Orozco-Borbon, M. V., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2008). The effect of reclaimed wastewater on the quality and growth of grapevines. *Water Science and Technology*, 57(9), 1445-1450.
- Mendoza-Espinosa, L., Victoria Orozco-Borbón, M., & Silva-Nava, P. (2004). Quality assessment of reclaimed water for its possible use for crop irrigation and aquifer recharge in Ensenada, Baja California, Mexico. *Water Science and Technology*, 50(2), 285-291.
- Mietz, L. K., Civit, B. M., & Arena, A. P. (2024). Life cycle assessment to evaluate the sustainability of urban agriculture: opportunities and challenges. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48(7), 983-1007.
- Montejo Murillo, S., Sarmiento Franco, J. F., & Monforte Méndez, G. A. (2023). Sustentabilidad alimentaria y empoderamiento de mujeres en huertos de la zona periurbana de Mérida, Yucatán. *Región y sociedad*, 35.
- Moreno Gaytán, S. I. (2022). Entre lo comunitario y la escasez: La práctica de la agricultura urbana en la zona oriente del Valle de México. *Trace (México, DF)*, (81), 24-47.
- Moreno-Gaytán, S. I., Jiménez-Velázquez, M. A., & Hernández-Juárez, M. (2019). Sustentabilidad y agricultura urbana practicada por mujeres en la Zona Metropolitana de Ciudad de México, Valle de Chalco Solidaridad. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 29(54).
- Muñoz-Euán, N., Mendoza-Espinosa, L., & Correa-Reyes, J. G. (2024). The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review. *Hydroponics: The Future of Sustainable Farming*, 123-147.
- Ndulini, S. F., Sithole, G. M., & Mthembu, M. S. (2018). Investigation of nutrients and faecal coliforms removal in wastewater using a hydroponic system. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106, 68-72.

- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Edición especial. Disponible en: [https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023\\_Spanish.pdf?\\_gl=1\\*uowh1y\\*\\_ga\\*ODg5NzM0MDIwLjE3MzA2MDUyMTY.\\*\\_ga\\_TK9BQL5X7Z\\*MTczNDI1MTQwNy4xMy4xLjE3MzQyNTE0MjQuMC4wLjA](https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*uowh1y*_ga*ODg5NzM0MDIwLjE3MzA2MDUyMTY.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTczNDI1MTQwNy4xMy4xLjE3MzQyNTE0MjQuMC4wLjA). Acceso el 16 de diciembre de 2024.
- Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for sustainable development*, 33, 695-720.
- Pantanella, E. (2018). Aquaponics production, practices and opportunities. *Sustainable Aquaculture*. (ed) Springer, Cham. 191-248.
- Poulsen, M. N., McNab, P. R., Clayton, M. L., & Neff, R. A. (2015). A systematic review of urban agriculture and food security impacts in low-income countries. *Food Policy*, 55, 131-146.
- Pribadi, D. O., & Pauleit, S. (2015). The dynamics of peri-urban agriculture during rapid urbanization of Jabodetabek Metropolitan Area. *Land use policy*, 48, 13-24.
- Pritsa, T. S., Fotiadis, E. A. y Lolas, P. C. (2008). Tolerancia del maíz a la atrazina y cadmio y del girasol al cadmio en suelo y cultivo hidropónico. *Comunicaciones en ciencia del suelo y análisis de plantas*, 39 (7-8), 1168-1182.
- Ramírez, E. A. (2016). Espacio público residencial en baja california. la construcción social de lo urbano entre lo informal y lo institucional. *Aproximaciones a la historia del urbanismo popular: experiencias en ciudades mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ramos Truchero, G. (2015 a). Revisión teórica y limitaciones del concepto de desiertos alimentarios. *Revista de Humanidades*, 25, 85 – 102.
- Ramos Truchero, G. (2015 b). El acceso a la alimentación: el debate sobre los desiertos alimentarios. *Investigación y Desarrollo*, 23(2), 391-415.
- Saidi, N., Jabeur, C., & Bakhrouf, A. (2012). Using of the ornamental fish in wastewater biological treatment. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 40(5), 499-505.
- Sarfraz, U. (2020). Review on Aquaponics System as A Sustainable Food Production Source. *LGUJLS*. 4(04), 330-348. doi.org/10.54692/lgujls.2020.0404128.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (31 de octubre de 2021). Día Mundial de las Ciudades. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-mundial-de-las-ciudades-286745>. Acceso el 31 de octubre de 2024.

- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (2023). Guía de criterios técnicos para la selección de proyectos piloto de Desarrollo Orientado al Transporte. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/875201/Gui\\_a\\_de\\_criterios\\_te\\_cnicos\\_para\\_la\\_seleccio\\_n\\_de\\_proyectos\\_piloto\\_de\\_Desarrollo\\_Orientado\\_al\\_Transporte.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/875201/Gui_a_de_criterios_te_cnicos_para_la_seleccio_n_de_proyectos_piloto_de_Desarrollo_Orientado_al_Transporte.pdf). Acceso el 15 de abril de 2024.
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PloS one*, 6(8), e23777.
- Seymour, G. (2017). Women's empowerment in agriculture: Implications for technical efficiency in rural Bangladesh. *Agricultural Economics*, 48(4), 513-522.
- Skar, S. L. G., Pineda-Martos, R., Timpe, A., Pölling, B., Bohn, K., Külvik, M., ... & Junge, R. (2020). Urban agriculture as a keystone contribution towards securing sustainable and healthy development for cities in the future. *Blue-Green Systems*, 2(1), 1-27.
- Slater, R. J. (2001). Urban agriculture, gender and empowerment: an alternative view. *Development Southern Africa*, 18(5), 635-650.
- Souza, R., Paz, V., Gonçalves, K., Soares, T., Neto, A., & Gheyi, H. (2018). Treated domestic effluents: an option for cultivation of ornamental sunflower in a hydroponic system. *Journal of experimental agriculture international*, 24(6), 1-11.
- Tomlinson, L. (2017). Indoor aquaponics in abandoned buildings: a potential solution to food deserts. *Sustainable Development Law & Policy*. 16(1), 5.
- Trauger, A., Sachs, C., Barbercheck, M., Brasier, K., & Kiernan, N. E. (2010). "Our market is our community": Women farmers and civic agriculture in Pennsylvania, USA. *Agriculture and Human Values*, 27, 43-55.
- United Nations (UN). (2018). Gender equality: Why it matters. Disponible en: [www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-5.pdf](http://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-5.pdf). Acceso el 20 de octubre de 2022.
- United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Women as Agents of Change for Greening Agriculture and Reducing Gender Inequality. Disponible en: <https://www.undp.org/publications/dfs-women-agents-change-greening-agriculture-and-reducing-gender-inequality>. Acceso el 27 de junio de 2024.

- Valverde, J. M., & Avilés-Palacios, C. (2021). Circular economy as a catalyst for progress towards the Sustainable Development Goals: A positive relationship between two self-sufficient variables. *Sustainability*, 13(22), 12652.
- Waller-Barrera, C., Mendoza-Espinosa, L., Medellín-Azuara, J., & Lund, J. R. (2009). Optimización económico-ingenieril del suministro agrícola y urbano: una aplicación de reúso del agua en Ensenada, Baja California, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 24(4), 87-103
- Wang, S., Bai, X., Zhang, X., Reis, S., Chen, D., Xu, J., & Gu, B. (2021). Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. *Nature Food*, 2(3), 183-191.
- Whittinghill, L., & Sarr, S. (2021). Practices and barriers to sustainable urban agriculture: a case study of Louisville, Kentucky. *Urban Science*, 5(4), 92.
- Zimmermann, M., Fischer, M. (2020). Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *J. Water Reuse Desalinat.* 10(4), 431-442. doi: 10.2166/wrd.2020.026.

## CAPÍTULO II: LA ACUAPONÍA Y LA AGENDA 2030

### THE USE OF AQUAPONIC SYSTEMS TO ACHIEVE THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OBJECTIVES OF THE 2030 AGENDA: A SYSTEMATIC REVIEW”.

**Trabajo publicado en “Encyclopedia of Sustainability Science and Technology 2nd edition”:**

Muñoz-Euán, N., Mendoza-Espinosa, L., & Correa-Reyes, J. G. (2024). The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review. *Hydroponics: The Future of Sustainable Farming*, 123-147. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3993-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3993-1_7)

#### **Abstract**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un llamado urgente a la acción para que todos los países, desarrollados y en desarrollo, pongan fin a la pobreza y otras privaciones para el desarrollo social y económico. Los recursos hídricos son un prerrequisito para todo desarrollo y el punto de encuentro de varios problemas ambientales y sociales. El agua dulce es finita y la agricultura es la actividad más demandante de este recurso en todo el mundo.

Las técnicas agrícolas no convencionales como la acuaponía son más sostenibles que la agricultura convencional. Aunque ya se han explorado los beneficios sociales, ambientales y económicos que puede promover la acuaponía, no se ha descrito un análisis detallado de sus contribuciones hacia los ODS. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue revisar la relevancia de la acuaponía en el cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Se realizó una búsqueda bibliográfica y los resultados se presentan de manera descriptiva. Se encontró que la acuaponía sirve como herramienta para: la obtención de alimentos, salud y bienestar para todas las personas, creación de empleos dignos, saneamiento del agua, concientización del cuidado del medio ambiente y sus recursos, creación de ciudades y comunidades sostenibles y adaptativas frente a los efectos del cambio climático.

La implementación del sistema acuapónico ha resultado estar en función del logro de los ODS, observando la superposición de las metas haciendo evidente lo esencial de que todos los objetivos trabajen en conjunto, cumpliendo precisamente con el ideal de la Agenda 2030 y lo que representa el desarrollo sostenible. Finalmente, en este estudio se analizó el cumplimiento de los ODS con la

implementación de la acuaponía, se presentan los aportes de cómo puede contribuir fuertemente a un desarrollo más sostenible.

A través de características como la escalabilidad, adaptabilidad y el uso eficiente de los recursos, lleva al sistema a continuar con los principios de la economía circular, gestionando de forma sostenible los recursos naturales como el agua y los nutrientes, lo que contribuye a la reducción de la contaminación de los océanos, aguas superficiales y subterráneas principalmente por el vertido de efluentes acuícolas no tratados, así como residuos de la agricultura tradicional que contribuyen a la erosión del suelo, la desertificación y la contaminación del suelo por el uso de pesticidas, fertilizantes o productos químicos. Es así como la acuaponía funciona como un sistema agrícola sostenible, estando en función de los ciclos naturales (principio biomimético) y utilizando eficientemente los recursos naturales, no limitándose allí, sino permitiendo también que sea considerada como una agricultura orgánica donde la influencia del público se beneficiaría en hacerla una práctica más común.

**Palabras clave:** acuaponía; agricultura sostenible; eficiencia; Objetivos de Desarrollo Sostenible



---

## The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review

Nayla Muñoz-Euán,  
Leopoldo Mendoza-Espinosa and  
Juan Gabriel Correa-Reyes  
Instituto de Investigaciones Oceanológicas,  
Universidad Autónoma de Baja California,  
Ensenada, Baja California, Mexico

### Article Outline

Definition of the Subject  
Introduction  
A Review  
Future Directions  
Bibliography

---

### Keywords

Aquaponics · Sustainable agriculture ·  
Efficiency · Sustainable development goals

### Definition of the Subject

The 2030 agenda, which includes 17 objectives and 169 goals, has as its principle “leave no one behind.” Its structure is based on achieving Sustainable Development Goals (SDGs), a common promise of all countries for the benefit of people and the planet, to satisfy our needs without compromising the resources of future generations. Aquaponics, which consist of the combined production of crops and aquatic organisms, can be used as a tool to achieve the 2030 agenda. Currently, aquaponic system designs have multiple application scenarios, ranging from designs for garden hobbyists (low technology) to large commercial productions (high technology). Thanks to the fact that it is based on the principles of a

biomimetic natural system, it has been conceived as a sustainable agricultural system. The present chapter analyzes and describes the specific contributions of aquaponics to reaching the SDGs of the 2030 Agenda.

### Introduction

The Sustainable Development Goals (SDGs) have as predecessors the Millennium Development Goals (MDGs), derived from the United Nations Millennium Declaration signed in the 2000 by the UN Member States, with the goal to be achieved by 2015 (WHO 2018). In 2015, the MDGs were replaced by the SDGs, and 17 objectives, and 169 goals were included, which covered the limitations of the MDGs and expanded their impact (Fukuda-Parr 2016). The concept of “leave no one behind,” characterized the SDGs by strengthening and empowering different target areas (Stuart and Woodroffe 2016). The SDGs are led primarily by the UN, but each country has its own agenda derived from the 2030 Agenda. Globally, there are 193 member countries that have adopted the 2030 Agenda.

The SDGs are an urgent call to action for all countries, developed and developing, to end poverty and other deprivations for social and economic development worldwide. Water is a prerequisite for all development (Braga 2018) and the meeting point for various environmental and social issues. Currently, one in three people worldwide lacks access to drinking water, and it is projected that by 2030, at least half of the world’s population will face severe water stress (UNEP 2016; UN 2021a). It is estimated that water use since the 1980s has been increasing by 1% per year worldwide because of increasing demand from developing countries that are only catching up with developed countries, where the water use per capita is higher (UNESCO 2019).

Considering that, although the planet contains around 1400 million cubic km of water, only 0.003% are freshwater resources, that is, water for human consumption, so that different

activities can be carried out where agriculture is the greatest demand of this resource that even in developing countries can reach up to 95% (FAO 2017, 2019). Conventional agriculture has impacts on the environment such as high demand for fertile land, high consumption of fertilizers, and degradation of the land surface (Li et al. 2018; Bich et al. 2020). This has been increased by the demand for agricultural products due to the increase in the world population. For this reason, the transformation of conventional agriculture to a more sustainable one, such as biodynamic agriculture, permaculture, hydroponics, and/or aquaponics is required (Love et al. 2014; Rigolot and Quantin 2022).

Aquaponics is a plant production system (hydroponics) based on the recirculation of water into which aquaculture is integrated (cultivation of aquatic organisms). Its origin comes from sustainable agriculture (Tomlinson 2017; Sarfraz 2020). The advantages of the combination of hydroponic and aquaculture systems compared to traditional cultivation techniques lie in the fact that it is a sustainable agricultural technology whose main merits are to reduce the use of natural resources (e.g., water and nutrients) and take advantage of the waste from fish farming in the cultivation of plants, which contributes to reducing the rate of water exchange.

The social, environmental, and economic benefits that aquaponics can promote have been explored in several studies that report that this system has the potential to participate in the achievement of 11 of the 17 different SDGs (Abusin and Mandikiana 2020; Shah and Saad 2020; Danish et al. 2021; Fruscella et al. 2021; Milliken et al. 2022), namely: SDG 1 – No Poverty, SDG 2 – Zero Hunger, SDG 3 – Good Health and Well-Being, SDG 4 – Quality Education, SDG 6 – Clean Water and Sanitation, SDG 7 – Affordable and Clean Energy, SDG 8 – Decent Work and Economic Growth, SDG 11 – Sustainable Cities and Communities, SDG 12 – Responsible Consumption and Production, SDG 13 – Climate Action, SDG 14 – Life Below Water.

An example of aquaponics action in participating in the SDGs is the implementation of these systems in dry and water-scarce regions in Africa,

which has made it possible to reduce environmental footprints and ensure food security through the supply of animal and plant foods (Obirikorang et al. 2021). In South Africa, where in some places there is a shortage of agricultural production resources (water and fertile cropland), a high rate of urbanization, and an increase in urban poverty, aquaponics has provided tools to cope with this situation in addition to having the potential to rehabilitate degraded areas such as degraded coal mining sites (Mchunu et al. 2018; Obirikorang et al. 2021). On the other hand, Indonesia has approximately 10% food insecurity, and although it retains fertile land, part of this area originally dedicated to agriculture has been converted into industrial and residential areas, so aquaponics seeks to increase the number of urban agricultural entrepreneurs, increasing income and promoting family businesses (Simorangkir 2018).

Although the relationship of aquaponics in the fulfillment of some SDGs has already been reported (as mentioned before), the specific contributions for each of the objectives have not been described considering the goals of the 2030 Agenda.

Therefore, the objective of the chapter is to review the relevance of aquaponics in the fulfillment of the SDGs of the 2030 Agenda for Sustainable Development.

## A Review

A bibliographic search was carried out using Google Scholar, and the results are presented individually by SDG or by grouping those that are related and present similarities for the fulfillment of each goal (Table 1). The documents were ordered by relevance using 3–4 keywords chosen (Table 1), considering the following inclusion criteria: the study had to be published in peer-reviewed journals, conference publications, congresses, working papers, book reviews, or by official organizations such as the UN and the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

The starting date for the search was 2000, since it was the year in which world leaders signed the

**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Table 1** Keywords for each SDGs

Sections: SDGs	Aquaponics and/with/like...			
1 No poverty	Poverty reduction	Low income	Marginalized people	Food challenges
2 Zero hunger				
3 Good health and well-being	Health	Human well-being	Healthy food	Food security
4 Quality education	Education	Education	Supports education	Use of the system in education
5 Gender equality	Gender equality	Women	Participation women	Children
6 Clean water and sanitation	Use of wastewater	Reducing water pollution	Water quality	Efficient use of water
7 Affordable and clean energy	Energy	Energy efficiency	Renewable energy	
8 Decent work and economic growth.	Decent work	Entrepreneurship	Empower people	Equal opportunity
10 Reduced inequalities				
9 Industry, innovation, and infrastructure.	Sustainable infrastructures	Inclusive and sustainable industrialization	Inclusive and sustainable human settlements	Reduction of environmental impacts
11 Sustainable cities and communities				
12 Responsible consumption and production.	Management of natural resources	Efficient use of natural resources	Awareness of climate change	
13 Climate action				
14 Life below water	Reduce marine pollution	Sustainable aquaculture	Land and soil	Use degraded land and soil
15 Life on land				
16 Peace, justice, and strong institutions	Reduction of violence	Refugees	Refugee camps	
17 Partnerships for the goals	Environmental technology	Market access	Policies for sustainable development	

United Nations Millennium Declaration, from which the MDGs, which serve as predecessors of the SDGs, were derived (WHO 2018; Wirza and Nazir 2021). The maximum publication date was set for September 2022.

The final selection of the studies consisted of reporting the synergy of the SDGs, managing to integrate more than one of the objectives, resulting in 68 relevant documents. The results of the search are presented next.

### Aquaponics in Fighting Poverty and Hunger (SDG 1 and 2)

The world population will increase by 25% between 2021 ( $7.8 \times 10^9$  inhabitants) and 2050 ( $9.8 \times 10^9$  inhabitants) (UN 2017; The World Bank 2021), thereby increasing the demand for

resources. By 2030 alone, it will be necessary to meet the nutritional needs of around 8.6 billion inhabitants ( $8.6 \times 10^9$  inhabitants), where food production may be challenged by climate change, pollution, and the lack of arable land (UN 2017; Obirikorang et al. 2021). Currently, deficiencies in the food supply infrastructure are called food deserts and consist of geographic locations where there is a lack of fresh and healthy food (König et al. 2016; FAO, PAHO, WFP, and UNICEF 2018). Furthermore, due to the recent COVID-19 pandemic, the world population is on the brink of its worst food crisis in 50 years (FAO 2020). The 20-year trend of global poverty reduction was reversed, and, thus, the SDG of ending poverty will not be achieved (UN 2020a). The projections prior to the COVID-19 pandemic

expected an increase from 75 to 95 million people living in extreme poverty in 2022 alone (The World Bank 2022), so it is essential to take measures to cope with this increment.

Aquaponics has been proposed as a solution to the problems associated with poverty and lack of food (Sunny et al. 2019; Obirikorang et al. 2021). This is because aquaponics provides an option to maintain: (1) healthy food production throughout the year; (2) dietary diversity; and (3) access to fish and vegetables of high nutritional quality (Wongkiew et al. 2017; Sunny et al. 2019; Abusin and Mandikiana 2020).

Worldwide, various combinations of aquatic and plant organisms have been cultivated in different experimental, domestic, commercial, and other types of aquaponic systems, achieving a great diversity of crops through various combinations (Table 2). It was found that the most frequent aquatic organism-crop combination is fish like tilapia and green leafy vegetables like lettuce, herbs, and basil (Table 2).

### **Aquaponics in Support of Health and Well-Being (SDG 3)**

Every human being has the right to have health and well-being for itself and to build prosperous societies. One of the pillars to guaranteeing health and well-being for the entire world population is food security. Food security means that everyone must have access to nutritious, healthy, diverse food in sufficient quality and quantity and at affordable prices to allow for the daily nutritional requirement (Simorangkir 2018; Sarfraz 2020). Food security is threatened by the economic inaccessibility to acquire enough food, as well as the availability of these in quantity, quality, variety, safety, and affordability (Simorangkir 2018), which poses health risks.

Aquaponics has been identified as a tool to satisfy food security worldwide, due to its ability to simultaneously provide food such as fish and vegetables in a reliable manner. By doing so, food sovereignty is achieved, where each community can work and control production (Sarfraz 2020). In general, the food produced in aquaponic systems is considered healthy and organic (Tomlinson 2017; Mchunu et al. 2018), since its

production can be done without compounds such as chemical fertilizers and/or antibiotics (Azad et al. 2016; David et al. 2022).

Besides promoting public health, the crops from aquaponic systems help to increase the low yield that is obtained in soil crops due to the presence of pests that appear on these surfaces (Azad et al. 2016; Subedi and Paudel 2020). Another advantage is that aquaponics helps to reduce the risk of contracting diseases transmitted by microorganisms found directly in the soil (Azad et al. 2016). And in the culture of aquatic organisms (animal protein), the microorganisms such as *Escherichia coli* (by warm-blooded animals) or *Salmonella* spp. may not be detected or present at low levels (by birds) (Wu et al. 2019; Somerville et al. 2022).

In the case of noncommunicable diseases, such as diabetes and heart disease, aquaponics is an alternative to counteract them. In Hawaii, approximately 128,653 (11.2%) of the adult population is diagnosed with diabetes, another 410,000 (37.1%) are prediabetes, and 39,000 people are undiagnosed, which represents a risk to their health (ADV 2021). The death rate from heart disease is 65.5% (Hawai'i Health Matters 2023). Fast food outlets abound in this state, where access to and availability of healthy foods for Native Hawaiians is limited. Aquaponics has been identified as a solution to this problem by providing healthy food and as a reminder for the Waimānalo community to stay healthy, making positive changes in their health and well-being (Beebe et al. 2020).

The recent crisis in the world health sector due to the pandemic outbreak of the COVID-19 virus has affected both the global economy and food production. Aquaponics, being a source of organic food and nutrients that can be produced from home (Shah and Saad 2020) could serve as a food security measure for this and future pandemics. As observed in the Middle East and Africa, where micro-scale aquaponics models were implemented to provide food security (Pantarella 2018; Obirikorang et al. 2021), as reported in Bangladesh in rural areas, where it is also another source of income for households (Sunny et al. 2019). On the other hand, large

**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Table 2** Combinations

of fish and plant species produced in an aquaponic system, reported in the scientific literature

Fish product	Plant product	Source	
Rainbow trout ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Basil ( <i>Ocimum basilicum</i> ); Lettuce ( <i>Lactuca sativa</i> L. "Ostinata")	Goddek et al. (2015)	
Common carp ( <i>Cyprinus carpio</i> ), Grass Carp ( <i>Ctenopharyngodon idella</i> ), Silver Carp ( <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> )	Tomato ( <i>Lycopersicon esculentum</i> )		
Nile tilapia ( <i>O. niloticus</i> L.)	Basil ( <i>Ocimum basilicum</i> ); Okra ( <i>Abelmoschus esculentus</i> )		
African catfish ( <i>Clarias gariepinus</i> )	Spinach ( <i>Spinacia oleracea</i> )	Forchino et al. (2017)	
Murray cod	Lettuce		
Nile tilapia	Aubergine		
Eurasian perch	Tomato and cucumber		
Nile tilapia ( <i>O. niloticus</i> )	Tomatoes	Palm et al. (2018)	
Nile tilapia and African catfish ( <i>Clarias gariepinus</i> )	Herbs		
Murray cod ( <i>Maccullochella peelii peelii</i> )	Green oak lettuce ( <i>Lactuca sativa</i> )		
Tilapia	Lettuce	Greenfeld et al. (2019)	
Catfish	Tomatoes		
Trout	Lettuce, and basil		
Barramundi fish	Lettuce	Wu et al. (2019)	
Rainbow trout ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	Lettuce		
Tilapia (Nile and red)	Basil		
Tilapia ( <i>O. niloticus</i> )	Basil ( <i>O. basilicum</i> )		
Tilapia ( <i>O. niloticus</i> )	Basil ( <i>O. basilicum</i> )		
Tilapia ( <i>O. niloticus</i> )	Basil ( <i>O. basilicum</i> )		
Ornamental fish ( <i>Carassius auratus</i> L.)	Lettuce, rocket salad		
Tilapia	Lettuce		
Nile tilapia	Varying (morning glory, kale, tomato, basil, etc.)		
Carp ( <i>common carp</i> )	Lettuce (oak leaf and Batavia)		
Tilapia ( <i>O. niloticus</i> )	Pak choy ( <i>Brassica chinensis</i> )		
Tilapia and hybrid striped bass	Varying lettuce	Costache et al. (2021)	
Tilapia	Lettuce		
Nile tilapia	Romaine lettuce		
Nile tilapia	Basil, okra		
African catfish	Water spinach		
Nile tilapia	Pak choy, coriander		
Tilapia	Tomato		
Goldfish	Spinach		
Cyprinids species	Tomato		
Hybrid catfish	Lettuce		
Tilapia	Aubergines, perch, tomatoes, cucumbers		
Tilapia	Strawberries		
Tilapia	Cucumber		Breitenstein and Hicks (2022)
Nile tilapia	Lettuce and cilantro		
Hybrid walleye	Leafy greens		
Nile tilapia	Basil		
Nile tilapia and hybrid striped bass	Lettuce		

commercial aquaponic systems are characterized by a high level of biosecurity where environmental conditions can be fully controlled, ensuring a healthy environment for organisms such as fish and minimizing the risk of disease and parasite outbreaks (Hoevenaars et al. 2018).

#### **Aquaponics as a Form of Environmental Education (SDG 4)**

Education is a human right, and environmental education is the key to instructing people on the way in which they should relate to caring for the environment and achieve sustainable development (Jacobs-McDaniels 2014; Milliken et al. 2022). Environmental education is precisely the process that allows learning about the environment through exploration, participation, and decision-making in favor of the environment (Monroe et al. 2008; EPA 2022). Due to its interdisciplinary nature, aquaponics has facilitated the acquisition of an educational awareness of complex issues such as nature, recycling, and environmental ethics, as well as educational skills such as critical, systemic, and group work thinking (Hart et al. 2014; Kledal and Thorarinsdottir 2018).

Aquaponics is an educational and teaching tool for natural science concepts, from basic education to professional training (Mukhtarova and Kolokolova 2018; Milliken et al. 2022). Due to its scalability and adaptability, this system can be incorporated into school curricula, integrating into STEM subjects (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) or others such as biology, nutrition, chemistry, physics, sustainability, agriculture, aquaculture, horticulture, and food safety (Hart et al. 2013; Mukhtarova and Kolokolova 2018; Milliken et al. 2021). Through its design and maintenance, it facilitates the understanding of basic biological, chemical, and ecological principles of fish, plants, and water, as well as reinforcing concepts of hydrology, engineering, ecology, and agronomy (Hart et al. 2013; Clayborn et al. 2017; Junge et al. 2017).

Around the world, a great number of aquaponic systems have been implemented for various educational purposes (Table 3).

Hart et al. (2013) conducted telephone interviews with educators (N = 10) who were actively

using or had used aquaponics at school in North America within the past 5 years. They found that technical difficulties and restrictions in the application of aquaponics in the school environment were the main challenges. Participants suggested looking for solutions to make physical adaptations to the system, and in a certain way, adopt a sense of belonging through community connection and support (Hart et al. 2013).

Love et al. (2014), applied an online survey to 804 aquaponics practitioners and identified three levels of participation: commercials, hobbyists, and educators. The main motivation of the respondents was to promote environmental sustainability (Love et al. 2014).

Villarroel et al. (2016) applied a survey in European countries on the state of research and production of aquaponic systems. This survey was answered by 68 people from 21 European countries. Most of the respondents (98%) prioritize the use of aquaponics for educational purposes, and 41.1% highlight the implementation of this type of system in educational programs as their main interest (Villarroel et al. 2016).

Due to its emerging nature, aquaponics still requires the training of teachers as well as spaces or forums to disseminate the knowledge acquired from the use of the technology (Hart et al. 2013; Genello et al. 2015; Mukhtarova and Kolokolova 2018).

#### **Aquaponics and Gender Equality (SDG 5)**

Half of the world's population are women and girls, which represent half of the global productivity potential (UN 2018). Gender equality is a human right and does not mean that men and women receive the same treatment, but that every person, regardless of their sex, has the same access to opportunities (ONU Mujeres 2015).

To increase economic growth and social development, it is essential to empower women and girls (UN 2018). Only 50% of women of working age are in the labor force, while the percentage for men is 77%; therefore, the full participation of women would promote increased national growth rates (Cepal 2015; UN 2018). Agriculture represents a pillar of economic growth, where women have been recognized as agents of change for the

**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Table 3** Aquaponic projects with educational objectives

Application side or name of project	Educational degree or objective public	Objective and main observations	Source
Shrewsbury Elementary School, PA, USA	Elementary School	To care for and appreciating the needs of growing food, as well as what is necessary for fish feed and plant nutrition. Tomatoes, cucumbers, lettuce, and watercress were grown	Nelson (2007)
Instituto Cape Eleuthera (CEI), The Island School, The Bahamas	16–19 years old	To offer a sustainable food production option in the Bahamas and develop a specific skill or trade within the community	Nelson (2007), The Island School (2021)
Providence Junior and Senior High School, IN, USA	12–19 years old	To improve the education of the young residents of Providence Junior and Senior High School Students monitored the system and the tilapia farm and produced a wide variety of vegetables	Nelson (2007)
Herring Gut Learning Center, Port Clyde, ME, USA	High school	To educate students, teachers, and the public about Maine's marine resources Rockland Alternative Education Program students built a small aquaponics system which they monitored, cared for, and kept running. The products were sold to local restaurants and stores	Nelson (2007)
Canby High School, OR, USA	High school	To build a mobile greenhouse to expose the aquaponic system and biotechnology to schools and nearby communities	Nelson (2007)
The Culinary Arts class, Columbia Area Career Center, MO, USA	High school and college	To grow in the classroom: herbs (eg cilantro and thyme) and tilapia, for daily use in preparing a wide variety of foods	Nelson (2007), Columbia Area Career Center (n.d.)
Tunstall High School, Dry Fork, VA, USA	High school	To prepare students for a variety of careers through the teaching of aquaponics, genetic engineering, and biotechnology. They were taught about the environmental impact of aquaponics, as well as about photosynthesis, plant, and animal reproduction, among others	Nelson (2007)
Bergen Country Academies, NJ, USA	High school	To combine through an aquaponic system environmental engineering and knowledge of computer software in a multidisciplinary project. Mathematics were used for the design of the system and zoology and botany for the care of fish and plants	Nelson (2007)
J.P. McConnell Middle School, GA, USA	Middle school	To analyze the quality of the water and the growth of the plants for decision-making on the steps to follow to solve the problems that arise The use of aquaponics with the bio-related technology portion was taught	Nelson (2007)
Herkimer College, NY, USA	College	To obtain knowledge for better informed decision making in the future and for a more sustainable behavior	Jacobs-McDaniels (2014)
Allegheny College, PA, USA	College	To integrate aquaponics into the community and raise awareness about sustainable values, attitudes, and behaviors	Hart et al. (2014)
Cincinnati Hills Christian Academy, OH, USA	High school	To use aquaponic systems for the teaching of biology, chemistry, environmental sciences, and sustainable agriculture	Hart et al. (2014)

(continued)

**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Table 3** (continued)

Application side or name of project	Educational degree or objective public	Objective and main observations	Source
Two upstate New York schools, NY, USA	Fifth and sixth grade	To introduce the classroom into “the natural world”, through aquaponic and hydroponic technology. This practice in students encourages pro-environmental behavior and knowledge of environmental problems	Schneller et al. (2015)
Kandri Village, SRG, Indonesia	Tourists	To create an educational tourist destination in the Kandri Village. Four RW (Rukun Warga/ community unit) were designated, where it is sought that each one obtains its economic development and its tourist characteristics	Rahdriawan et al. (2019)
Granja A, Araraquara, Brazil	Produtores brasileiros de acuaponia	To produce and market vegetables. This farm offered courses on environmental preservation, as well as the installation and operation of aquaponics systems	David et al. (2022)
Granja B, São Paulo, Brazil	Middle and high schools, college, social organizations, and the general community	To reintegrate people in a condition of social vulnerability. This farm is part of a non-profit, non-governmental organization and offers courses, workshops, and receives visitors	David et al. (2022)

global food system (UNDP 2023, Antriyandarti et al. 2024). However, worldwide, less than 15% of all farmland owners are women (FAO 2018). In this regard, aquaponics has demonstrated its potential to empower and emancipate women through various productive and commercial projects (Somerville et al. 2014; Pantanella 2018; Simorangkir 2018; Milliken and Stander 2019), some of which are presented below.

Since 2010, FAO, in partnership with European donors in the Palestinian Territories, has sought to empower women through small-scale aquaponics projects (Verner et al. 2017). An example is the Gaza Strip, where there are food restrictions and 97% of its population lives in urban areas or in camps without access to land (Milliken and Stander 2019). In this territory, 39% of families are headed by women without food security. Aquaponic units have been implemented on rooftops with the objective of combating food difficulties and increasing their income while caring for their children at home, having benefited 119 households that suffered from food insecurity (FAO 2016; Milliken and Stander 2019).

In Indonesia, the Chair of Family Welfare Development (PKK), in the village of Kembangan Selatan, Jakarta, in the Child Friendly Integrated Public Space (RPTRA), trained women into aquaponics systems in a home environment with the objective of providing food security to their families and obtaining knowledge about family financial management (Simorangkir 2018).

Part of the advantages that aquaponics offers, as observed in the Palestinian Territories, is that it is a great model for caring for children without leaving the home. It has the additional benefit of giving women a form of employment and to be able to educate their children from home (Bich et al. 2020). The implementation of the aquaponic system can be an alternative for places where, according to their sociocultural norms, such as the restriction of women from going out to work outside the home, they can participate in the cultivation of fish and plants from their home, acting as a source of income and respecting their social and religious norms (Sunny et al. 2019).

### **Aquaponics and Water Resources (SDG 6)**

Water is essential to carry out biological and vital processes for human and ecosystem functioning. All people must have a satisfactory supply of water, in terms of its efficiency, accessibility, and safety. However, the availability of water, like the availability of land, is finite, and its demand continues to increase. The most water-demanding activity is agriculture, where approximately 70% of the world's extraction of freshwater resources is used for this purpose (FAO 2017). In arid and semi-arid areas, the situation is even more critical, where up to 85% of the water is used for agriculture (Zimmermann and Fischer 2020).

Aquaponics makes better use of water, since it consumes up to 90% less water, achieving reuse efficiency rates of 95–99% of this resource (Hoevenaars et al. 2018; Milliken et al. 2022). One of the reasons why aquaponics is more efficient than traditional agriculture is mainly due to the circulation of water, since it only requires compensation for natural water losses such as: (1) evaporation, (2) transpiration from plants, (3) removal of solid waste from fish, and (4) splashing during fish feeding (Greenfeld et al. 2020; Yanes et al. 2020).

Water is more efficiently used in aquaponics as plants contribute to improving the quality of water for fish (Love et al. 2014; Hao et al. 2020). The use of aquaculture wastewater in aquaponics is presented as an environmentally safe way of removing contaminants from these effluents (Endut et al. 2016). The main compounds in aquaculture wastewater are nitrogenous products (ammonium, nitrite, and nitrate), phosphorus, dissolved organic carbon, and organic matter. It has been calculated that about 75% of the nitrogen and phosphorus added in fish feed are not used and persist as residues in the water; thus, in aquaponics, these become absorbed or transformed by the plants (Endut et al. 2011; Huang et al. 2021) rather than discharged to the environment.

The FAO, through community workshops, has promoted aquaponics as a food production technology, since it allows saving water and using it in places with scarce water resources (Pantanella 2018). In addition, it has been observed that in

regions with soils prone to flooding and coastal areas affected by salinity, aquaponic systems of the “floating” type can be used, in which the roots of the plants are in direct contact with the water, thus absorbing nutrients from fish waste (Sunny et al. 2019). With this practice, not only is poor water quality resolved, but it has also been suggested that it can contribute to reducing freshwater depletion by taking advantage of other unconventional sources of water that are usually wasted, such as rainwater (David et al. 2022) and the reuse of municipal domestic wastewater (Rana et al. 2011). This is particularly important for regions facing water stress or in areas with high climate risk (Goddek et al. 2015; Greenfeld et al. 2020; Diatin et al. 2021). Replacing non-renewable freshwater with domestic sewage effluent or rainwater could provide one more means to make these agricultural systems more sustainable (Cifuentes-Torres et al. 2021; David et al. 2022).

### **Energy Efficiency in Aquaponic Systems (SDG 7)**

Aquaponic systems require different kinds of energy, such as solar radiation, heat, electricity, among others for the growth and development of plants and fish (Atlason et al. 2017; Forchino et al. 2017; Mchunu et al. 2018). Energy consumption constitutes, together with water and fish feed, one of the most important inputs for aquaponics, but unlike conventional agricultural techniques, it allows to effectively manage the “water-energy-food nexus” through interconnections in favor of sustainability and food security (Love et al. 2014; Obirikorang et al. 2021; Milliken et al. 2022). Energy efficiency is a fundamental characteristic of aquaponics. The ecological impact of the technology has decrease with the use of renewable energy sources, by balancing the number of cultivation beds, optimizing the power of the water pumps and/or the use of gravity for the supply of water flow to the system (Junge et al. 2017; Greenfeld et al. 2020; Fruscella et al. 2021).

Aquaponic systems have used different types of renewable energy such as solar, wind, biogas, and geothermal. Junge et al. 2017 and Abusin and Mandikiana (2020) used solar power to decrease the dependency on electricity from the electrical

network. In the survey carried out on practitioners of aquaponic systems by Love et al. (2014), it is reported that at least 57% used renewable energy sources, solar being the most widely used, occasionally complemented with energy from wood or pellet stoves. (6%), compost as a heat source (3%), geothermal (3%), and wind (2%).

In warmer locations, such as the arid regions of the Persian Gulf, high levels of solar radiation can be used (Abusin and Mandikiana 2020). In countries such as Iceland and Japan, geothermal energy can be used by heat pumps to maintain the temperature at the level required by the crops (Goddek et al. 2015). Sarfraz (2020) suggest that the sustainability of the system can be evaluated through its energy requirements; this can be done through software based on programming languages (C++, Matlab, Python, etc.), which can help solve technical and resource efficiency problems, in this case the energy required, with farmers being the main beneficiaries.

From an energy production point of view, aquaponics can serve as an important source. A study by Atlason et al. (2017) calculated and compared the edible protein Energy Return on Investment ( $_{ep}EROI$ ) of fish protein production in aquaponic systems against fisheries or aquaculture systems. It was found that fish production in aquaponics provides as much net energy to society, or that it can use the same amount of energy, as, in other fishing techniques to produce high protein production, in the form of tilapia biomass (Atlason et al. 2017). Likewise, an aquaponic system does not require such an intensive use of energy as in the production of beef or similar meat (chicken and pork), and its net energy yield can be higher considering its geographical location (Atlason et al. 2017).

### **Aquaponics as a Promoter of Sustainable Economic Growth and the Reduction of Inequalities (SDG 8 and 10)**

Due to the continuous growth of the world population and its increasing pressure on natural resources, the decoupling of environmental degradation with economic growth must be achieved, and aquaponic can contribute to it. As mentioned earlier, compared to conventional agriculture,

aquaponics presents a high economic potential, by being an opportunity to create jobs and generate income from the sale of fish and vegetable products in urban and rural areas (El-Essawy et al. 2019; Aslinda et al. 2019; Cammies et al. 2021). Small to medium-scale, local/community-level aquaponics businesses can increase their income through the consumption of local materials and labor while improving their food production capacity (El-Essawy et al. 2019; Obirikorang et al. 2021). This contributes toward the empowerment of the community, which is highly related to sustainable development (Simorangkir 2018; Aslinda et al. 2019; Bakiu et al. 2020).

Local and regional demand for healthy and sustainable food products drives small- to medium-scale semi-commercial enterprises, which help alleviate the negative impacts of population growth and climate change (Palm et al. 2018; Obirikorang et al. 2021). Worldwide, the profitability of commercial aquaponic companies has been reported, alluding to the high potential for success of their implementation (Laidlaw and Magee 2016). And in communities, cities, or countries with areas of unemployment, food insecurity, or social problems related to inclusion, interest in aquaponic systems has been increasing, allowing the empowerment of aquaponics practitioners, thus improving access markets, and even valuing domestic work (Kledal and Thorarinsdottir 2018; Pantanella 2018).

In the medical area, aquaponics has provided emotional support and supported the rehabilitation of people after a shock (König et al. 2016; Beebe et al. 2020). Considering that for the SDGs, it is essential to guarantee that no one is left behind, Schneller et al. (2015) designed, for fifth and sixth grade students, the “Indoor Garden-Based Learning Lessons” program, which is based on the implementation of aquaponic systems in education. In this program, two students presented attention deficit hyperactivity disorder, which after a while showed better attention, learning, behavior, and even a pro-environmental attitude. Aquaponics has also been used as an innovative form of therapeutic horticulture, which seeks to promote the well-being of local communities, people with mental health

problems, or people with special conditions such as autism spectrum disorder (ASD) or intellectual disabilities, taking better advantage of their skills and being part of their daily lives (König et al. 2016; Milliken and Stander 2019). Associations such as the Rotary Club of Patan, Nepal, and the Rotary Club of Brussels, with financial and technical support from the Rotary International Club, led the implementation of an aquaponics system to support a rehabilitation home for 20 children and mothers affected by HIV/AIDS (Subedi and Paudel 2020).

The implementation of the aquaponics system favors the well-being of people, practices to address social inequality, and promotes improvements in the quality of life, while their economy benefits (Laidlaw and Magee 2016; Wirza and Nazir 2021; Bakiu et al. 2020).

#### **Aquaponics Promoting Sustainable and Innovative Infrastructures, Cities, and Communities (SDG 9 and 11)**

In 2020, at least 56% of the world population lived in urban areas, and it is expected that by 2030 this will increase to 60% (UN 2022). Urbanization is accompanied by an increase in the needs of transport networks, logistics, communication, cultural aspects, tourism, and sources of employment and consequently a greater demand for food and what is required for its supply (Dos Santos 2016; David et al. 2022). The supply of food to urban areas is frequently associated with the productive chains of rural areas. The centralization of populations in urban areas not only exerts greater pressure on natural resources, but they are particularly vulnerable to food insecurity, mainly due to their dependence on imported products from other regions (Laidlaw and Magee 2016).

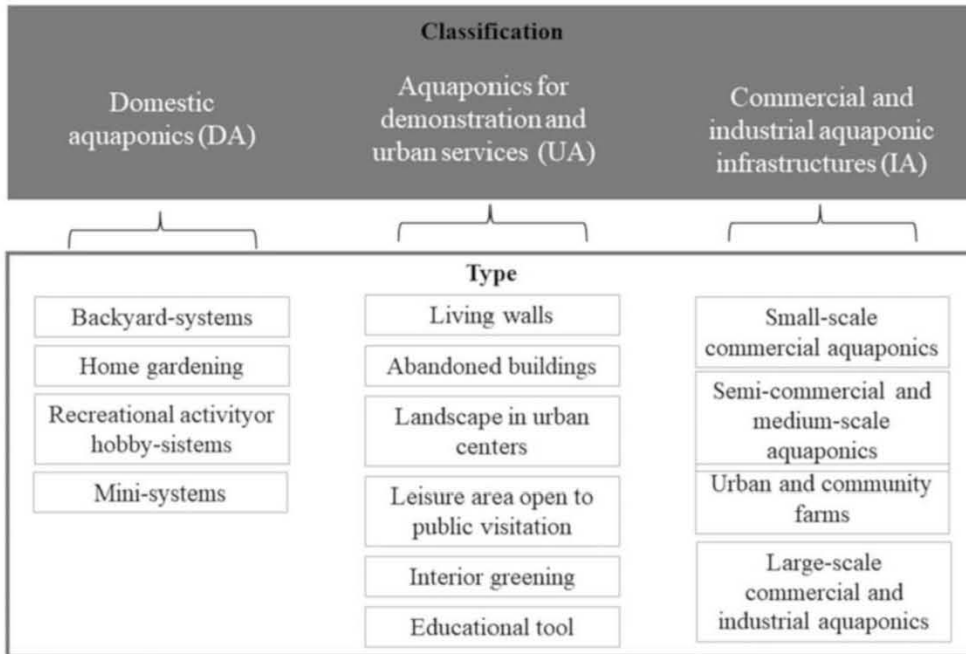
The need for sustainable local or urban food production becomes imperative, and it is believed that this can be achieved through aquaponics, which can be considered as a form of urban agriculture. This type of agriculture has a series of benefits such as: (a) it helps to counteract the “urban heat island effect” (UHI); (b) it improves the quality of the air in the locality, (c) it reduces carbon footprint; (d) it helps preserve

biodiversity; (e) it reuses organic household waste as fertilizers; and (f) it reuses and takes advantage of other sources of water (e.g., aquaculture wastewater or rain water) (Fruscella et al. 2021; Croce and Vettorato 2021).

Compared to products from rural areas, which are mostly food providers, the implementation of aquaponic technology in urban areas would minimize the distance between producer and consumer, reducing ecological and carbon footprints related to production and transportation of food, improves food security, as well as the resilience of food infrastructure (Hoevenaars et al. 2018; Fruscella et al. 2021). Also, the preparation of local food with aquaponics opens the way for the consumer to interact with farmers, to know the origin of their food and to be able to directly choose agricultural products (Goddek et al. 2015; Rahdriawan et al. 2019).

In addition to the low dependence on natural water sources, the available space is better used, since a simple aquaponic system can produce up to 6 times more crops per square foot than conventional agriculture (Subedi and Paudel 2020; Fruscella et al. 2021). The system can be adapted to rooftops, abandoned buildings, and even where inputs such as water or fertile land are scarce (Tomlinson 2017; Subedi and Paudel 2020).

Aquaponics systems in urban infrastructure can be classified as domestic aquaponics (DA), aquaponics for demonstration and urban services (UA), and commercial and industrial aquaponics infrastructures (IA) (Fig. 1). DA is a sustainable infrastructure at the local level for private purposes that serves as a source of fresh food in cities, and its implementation can be carried out in schools, hospitals, hotels, prisons, supermarkets, and shopping centers (Li et al. 2018; Palm et al. 2018). An example of UA systems (Fig. 1) is the “living walls,” which can serve as a demonstration, whose origins are hydroponic systems (Palm et al. 2018). The implementation of these systems can improve the landscape in cities, beautify the urban environment and serve as a leisure area open to the public (Palm et al. 2018; David et al. 2022).



**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Fig. 1** Classification of aquaponic systems and their types of infrastructure.

(Source: Junge et al. 2017; Tomlinson 2017; Verner et al. 2017; Mukhtarova and Kolokolova 2018; Palm et al. 2018; Subedi and Paudel 2020; David et al. 2022)

Aquaponic systems have the capacity to fulfill the purposes of “blue and green” infrastructure in cities. Aquaponics integrates the protection of biodiversity and efficient use of natural resources while promoting human well-being, thereby linking to the purpose of green infrastructure (König et al. 2016; Hao et al. 2020). It helps promote indoor greening, improving the climate in homes and buildings (König et al. 2016). Regarding the blue infrastructure, aquaponics can be incorporated into the local water cycle by reusing treated wastewater or rainwater instead of fresh water, following the principles of water reuse and nutrients, so it can be integrated into local biomass cycles (Goddek et al. 2015; König et al. 2016). The reuse of nutrients from the fish makes this technology ideal for any site and excellent for places where there is a cost for waste disposal and/or nutrient emissions (Abusin and Mandikiana 2020).

Aquaponics also facilitates to build stronger communities in areas of unemployment, with social problems related to inclusion, improvement in public health, awareness, and education as an educational tool (Fig. 1) (Kledal and Thorarinsdottir 2018; Greenfeld et al. 2019). It has been implemented successfully in the educational sector, providing educational infrastructures (Fig. 1) for all ages and with various objectives (Sección 3.3).

Another advantage of aquaponics in urban areas is the revitalization of abandoned urban spaces, such as industrial-type buildings, which facilitates the development of sustainable infrastructures that, in principle, have less residential value (Dos Santos 2016; Croce and Vettorato 2021). Such is the example of the Old Peer Foods factory, which was previously an abandoned meat packing building, with an approximate area of 8640 m<sup>2</sup> (93,000-square-foot) and

where food is now sustainably produced through aquaponic systems, taking advantage of food-grade materials that were abandoned in the factory, such as fish tanks and sedimentation tanks (Tomlinson 2017). Aquaponics can take advantage of spaces that are not suitable for other food production systems, discarding the pressure of urbanization on urban areas and arable land, while reducing the negative environmental impact of cities and helping in the preservation of the natural landscape (Fig. 1) (Goddek et al. 2015; Fruscella et al. 2021).

For the last classification, IA, it covers innovative and sustainable commercial and industrial infrastructures (Fig. 1). The potential of aquaponics companies has been reported; their application worldwide would help reduce the food crisis and promote sustainability (Yanes et al. 2020). Unlike the DA, the small-scale IA (Fig. 1) is based on the standardization of the technique, the resources, and the production areas, the size of which does not exceed 50 m<sup>2</sup> (Palm et al. 2018).

The type of semi-commercial aquaponic infrastructure already handles a high degree of mechanization, opening a gap for the retail and wholesale markets, marking a contrasting difference with the types of DA and small-scale, with a production area larger than 100 m<sup>2</sup> (Palm et al. 2018).

The FAO has developed workshops promoting the use of aquaponics as a technology to obtain food and save water on islands, areas with scarce resources, and even areas affected by climate change (Pantanella 2018). In Gaza, for example, a farmer and supplier created the largest aquaponics unit in the country, where FAO not only monitors its progress closely but also provides technical support as needed. By doing so, it allowed for the empowerment of more vulnerable farmers in the area so that they could generate income through the implementation of semi-commercial aquaponic systems (Verner et al. 2017).

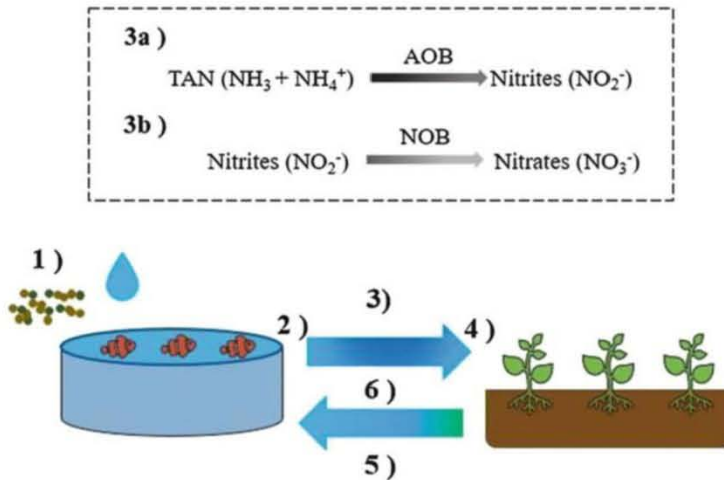
On a medium scale (Fig. 1) the production area varies between 100 and 500 m<sup>2</sup>. It already has a trend towards industrialization and a better degree of mechanization (Palm et al. 2018). A type of

medium-scale commercial aquaponics is reported by Li et al. (2018), who mention that building-based aquaponics integrated the production of plants and fish into existing construction infrastructures, saving resources as well as making efficient use of them, positioning itself as a new green urban architecture in the future. Urban and community farms can also be considered urban agriculture (Fig. 1). Farms and gardens, whether community or urban, provide other advantages such as the collaboration of neighborhood members and the beautification of the neighborhood, with the opening of being accessible to disadvantaged groups (Rahdriawan et al. 2019; Wirza and Nazir 2021; Cammies et al. 2021). In Indonesia, an educational tourist destination was created in Kandri Village; although the area was very limited, the community got healthy food, and they were very enthusiastic to become an aquaponics-themed village (Rahdriawan et al. 2019).

Finally, the large-scale aquaponics systems (Fig. 1) operate with a high degree of mechanization and require the highest investment costs and management skills, their consumers can be supermarkets, restaurants, institutions, and wholesalers (Palm et al. 2018). The estimated area for this type of commercial project is at least 1000 m<sup>2</sup>, where production becomes competitive with this plant and fish culture surface, with conventional horticulture and aquaculture products (König et al. 2016). Although this aquaponics practice has not been implemented on a global scale, in the reviewed applications (Fig. 1) at the DA level, or the UA and IA types, they contribute to global sustainability (Kaja et al. 2022).

### **Aquaponics Against Environmental Challenges Associated with Consumption Behaviors and Climate Change (SDG 12 and 13)**

Aquaponics follows the principles of the circular economy (CE) and the biomimetic natural system to recycle, reduce, and reuse inputs and waste (Hoevenaars et al. 2018; Wirza and Nazir 2021; Fruscella et al. 2021). The purpose of CE is to decouple economic growth from the negative consequences of depletion of resources and environmental degradation through the transformation of



**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Fig. 2** Biological cycle of an aquaponic system. (1) Entry of water and food for fish; (2) Fish alimentation and excretion; (3) Nitrification: 3a) Transformation of Total Ammonia Nitrogen

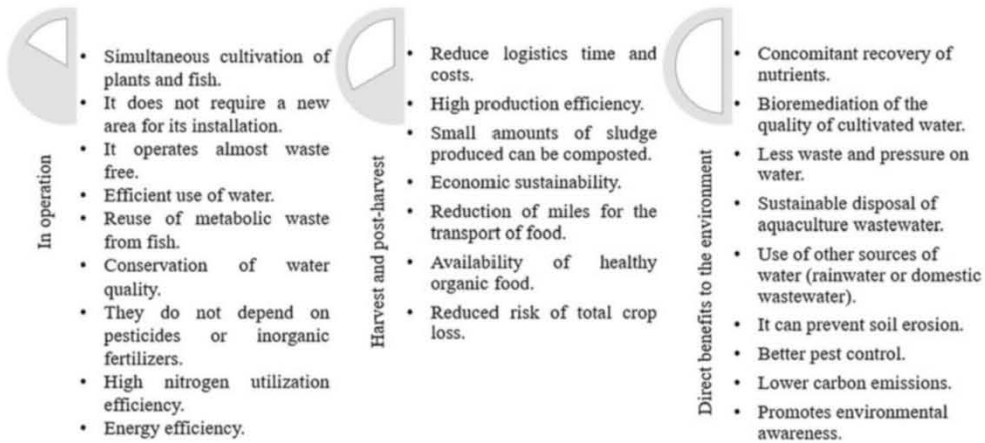
(TAN) to  $\text{NO}_2^-$ , 3b) Transformation from  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NO}_3^-$ ; (4) The plants filter contaminants and take advantage the nutrients from aquaculture wastewater; (5) Entrance of the water filtered by the plants to the aquaculture unit; and (6) cycle repetition

production and consumption systems, which leads to sustainable development (Camacho-Otero et al. 2018; Morseletto 2020). Aquaponic presents a symbiosis between fish, microorganisms and plants, a synergy of its biotic and abiotic components; therefore, it complies with the CE principles regarding nutrient cycling, regulation services (water sanitation), and food catering services (Goddek et al. 2015; Hoevenaars et al. 2018; Subedi and Paudel 2020; Milliken et al. 2021).

The basic inputs required by aquaponic systems are water and food for the fish. The biological cycle of the aquaponic system (Fig. 2) begins when the fish consume food and excrete. Fish waste is loaded with nutrients in the form of Total Ammonia Nitrogen (TAN), where Ammonium Oxidizing Bacteria (AOB) like *Nitromonas*, *Nitrosococcus*, and *Nitrosospira* help to convert it into nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) (Subedi and Paudel 2020; Yanes et al. 2020). Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), which is toxic to fish, is oxidized to nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) by nitrite-oxidizing bacteria (NOB) such as *Nitrobacter* and *Nitrococcus* (Azad et al. 2016;

Subedi and Paudel 2020). The process of transforming TAN into nitrate is called nitrification.

As already mentioned, plants can take advantage of nitrate or phosphorus as they are essential for their growth, there by promoting sustainable use of water and nutrients (Yanes et al. 2020; Milliken et al. 2022). The plants in this system act as a natural filter to remove dissolved forms of nitrogen and phosphorus from the metabolites of the fish waste in the culture water, allowing it to be a form of sustainable disposal of these compounds, which otherwise could contribute to contamination, being one of the main disadvantages of aquaculture systems (Roosta 2014; El-Essawy et al. 2019). In the case of techniques such as hydroponics (vegetable production), that require expensive mineral fertilizers, which leads to the depletion of valuable and essential nutrients, which are often unsustainably extracted (Atlason et al. 2017; Hoevenaars et al. 2018). Based on the advantages and disadvantages of aquaculture and hydroponic systems, aquaponics manages to capture them as benefits. Figure 3 summarizes some



**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Fig. 3** Findings in

favor of caring for the environment in the operation, harvest and postharvest, and direct benefits to the environment

rewards associated with the implementation of aquaponic systems, whether in their operation, harvest, and postharvest, and some direct benefits reported to the environment. The operation can be carried out with almost no waste of water or nutrients, and in postharvest it minimizes food waste and increases its availability (Hoevenaars et al. 2018; Abusin and Mandikiana 2020).

The implementation of aquaponic systems provides positive impacts on society, such as landscape improvement, support for food security, water sanitation, the creation of sustainable cities and communities, and adaptation to climate change (Pantanella 2018; Sunny et al. 2019; David et al. 2022). The application of aquaponics has been very versatile and innovative, the climatic conditions of the site have been used, and its adaptation has occurred in places such as: (1) with scarce or contaminated water, since it makes efficient use of this vital resource; (2) in places with frequent rains that can be used in aquaponic systems; (3) in cities with a need to mitigate urban heat islands, where aquaponics technology can provide support; and (4) in communities that need to mitigate the effects of climate change and improve the resilience of food infrastructure (Junge et al. 2017; Fruscella

et al. 2021; Milliken et al. 2021; Obirikorang et al. 2021).

The reduction of negative impacts on the environment can be increased with the help of production efficiency, which can promote environmental awareness among consumers with the help of producers, governments, and educational institutions (Gichana et al. 2019; Greenfeld et al. 2020; David et al. 2022). The increase in environmental awareness among consumers is an advantage for the future growth of aquaponics, which will also be influenced by the availability of natural resources and market demand (Hart et al. 2013; Gichana et al. 2019).

However, education plays a very important role in achieving environmental awareness; aquaponics has served as an educational tool (Table 3) to care for the environment since it is in the classrooms where children can be influenced to adopt environmentally friendly behaviors (Hart et al. 2014; Milliken et al. 2022).

Finally, the UN Secretary-General proposed six positive actions for the climate (UN n.d.), with the aim that governments can rebuild their economies and societies after the COVID-19 pandemic, where aquaponics can collaborate for it (Table 4).

**The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review, Table 4** Aquaponics in compliance with the Six Climate-Positive Actions

Six Climate-Positive Actions	Aquaponics for the benefit of the climate
Invest In Green Jobs	It encourages entrepreneurship and the creation of sustainable agricultural jobs by growing healthy products. Jobs that can be taken advantage of by young people, women, men, vulnerable people, or people with special conditions
No Bailout for Polluting Industries	Aquaponic industries are friendly to the environment. In general, they contribute to the reduction of the land footprint needed for food production, and the animal (fish) protein produced in these aquaponic systems is considered to have the lowest carbon footprint, achieving lower carbon footprint economic
End Fossil-Fuel Subsidies	Aquaponics enables food production close to the consumer which reduces fossil fuel emissions and the carbon footprint associated with transporting and distributing products from rural areas to cities
Climate In All Decisions	Aquaponics embraces the purpose of green infrastructure but requires urban policy makers and government to recognize that the combination of natural resources and human well-being provides benefits such as urban cycling in terms of water, energy and food and incentivizes the use soil mix. Farm subsidies and subsidies can promote technological and innovative farming systems
Work Together	Through the scientific publications of the findings found in the implementation of aquaponic systems, the exchange of information between countries is encouraged. An example of international cooperation is small-scale aquaponics projects in partnership with European donors since 2010 and the FAO for 119 female-headed households, improving their food security and income while taking care of their homes and children
Leave No One Behind	In various projects where aquaponics has been implemented, young people, women and men have been included, providing equal opportunities. In turn, the aquaponic system can be implemented in arid environments, in remote areas, on islands, in places that suffer from drought or scarce water resources, in regions with soils prone to flooding, in coastal areas affected by salinity, or in soils in areas where soil is scarce or contaminated and even on rooftops and abandoned buildings and allows adaptation to climate change. With this, plants and fish can be obtained throughout the year

Made from information from UN (n.d.), Dos Santos (2016), König et al. (2016, 2018), Palm et al. (2018), Pantanella (2018), Greenfeld et al. (2019), Milliken and Stander (2019), El-Essawy et al. (2019), Sunny et al. (2019), Abusin and Mandikiana (2020), Hao et al. (2020), Aslinda et al. (2019), Cammies et al. (2021), Cifuentes-Torres et al. (2021), Croce and Vettorato (2021), Fruscella et al. (2021), Milliken et al. (2021), Obirikorang et al. (2021), Vermer et al. (2017), Kaja et al. (2022)

**Sustainable Use of Aquatic Life and Terrestrial Ecosystems with Aquaponics (SDG 14 and 15)**

The largest ecosystem on planet Earth is the ocean. It covers 70% of its surface, participates in climate stabilization and carbon storage, and provides great biodiversity while favoring human well-being (UNFCCC 2021). Globally, the pollution of the oceans is alarming, and around 70–75% of marine pollution originates on land due to human activities (Escobar 2002). Conversely, the oceans capture about 23% of the annual emissions of anthropogenic CO<sub>2</sub> (WMO 2022). Meanwhile, terrestrial ecosystems such as forests can act as carbon sinks, every year they absorb approximately 2 billion tons of CO<sub>2</sub>, but

unfortunately, these forests have been reduced since human activity has altered almost 75% of the earth's surface (UN 2019, 2020b).

With the world population increasing, there is a high demand for food that is intensifying conventional agriculture (Pantanella 2018; Milliken et al. 2021). This food production has led to loss of fertile land, pesticide-induced loss of pollinators, water scarcity, soil and water contamination with fertilizers and chemicals (Pantanella 2018; Bich et al. 2020; Cammies et al. 2021).

Likewise, world fish consumption has increased since the late 1990s, which has increased total fish and aquaculture production, growing proportionally with the world population

(Atlason et al. 2017). In the period from 1990 to 2021, total global aquaculture production expanded by around 650% in terms of annual production, and the population increased by 50% (The World Bank 2023a, b). Aquaculture has the potential to reduce the pressure on wild fisheries, but this practice represents a large water footprint because frequent freshwater exchanges are required, ranging from 30 to 100% (Roosta 2014; Pantanella 2018; Gichana et al. 2019).

Plants in the aquaponic system help improve water quality for fish, act as a circulating biological filtration system (Fig. 2), absorb nutrients from aquaculture farming, convert them into plant biomass, and minimize effluent discharge into the environment (Bich et al. 2020; David et al. 2022).

Different studies have reported the removal of different chemical compounds such as nitrites (82.93–92.22%, Endut et al. 2011; 93.75%; Endut et al. 2016), nitrates (<75%, Rana et al. 2011; 79.17–87.1%, Endut et al. 2011; 81.47%; Endut et al. 2016), TAN (78.32–85.84%, Endut et al. 2011; 92.77%; Endut et al. 2016), orthophosphates (75.36–84.94%, Endut et al. 2011; 80.1%; Endut et al. 2016) and coliform bacteria (*Escherichia coli*) (91.10–92.18%, Rana et al. 2011).

The efficiency of water and energy in an aquaponic system increases dramatically when compared to conventional agriculture and aquaculture. Producing fish requires less energy than raising terrestrial animals, reducing the ecological footprint in the production of animal protein since fish do not require energy to heat their bodies, obtaining more body mass from their diet (Pantanella 2018; Abusin and Mandikiana 2020).

The result of conventional agriculture has been the destruction of forests and the rapid degradation of the soil (Bich et al. 2020). Farmers have had to go to forced marches in the face of rapid population growth and climate change, which in turn require plowing, weeding, fertilizing, and irrigating to grow crops (Azad et al. 2016; Pantanella 2018; Obirikorang et al. 2021). Aquaponics contributes to reducing deforestation and forest degradation while rehabilitating

degraded land and soils (Junge et al. 2017; Tomlinson 2017; Hoevenaars et al. 2018).

Other benefits of the implementation of aquaponic systems are obtaining income, increasing the economic benefits of farmers or practitioners of this system (Greenfeld et al. 2019), and favoring the sustainable management of fishing, aquaculture, and tourism (Rahdriawan et al. 2019; Cammies et al. 2021). At the same time, it allows crop diversification, which is of vital importance, especially considering that monocultures have become a vice (Pantanella 2018; Greenfeld et al. 2019). The polyculture obtained through aquaponics increases the diversity and breeding yields of aquatic and plant organisms, having a better control of pests and microorganisms, since the conversion of fish waste to plant nutrients creates a highly competitive and resistant, where pathogens have a hard time thriving (Azad et al. 2016; Pantanella 2018; Abusin and Mandikiana 2020).

#### **Aquaponics in Support of People in Vulnerable Situations (SDG 16)**

A vulnerable person, group, or population is one that has characteristics that make it susceptible to greater risk due to unsafe conditions in its environment or due to social inequalities (Rukmana 2014; Climent-Gil et al. 2018; Kuran et al. 2020).

At the end of 2021, more than 89 million people around the world were forced to leave their homes due to “persecution, conflict, violence, human rights violations or events that disturb public order,” and approximately 27.1 million were refugees (UNHCR 2022). The number of refugees will tend to increase because of climate change, making it necessary to establish strategies to reduce threats due to movement limitations, mainly food insecurity. To satisfy food security, sustainable cultivation technologies can be adopted, such as aquaponics, which has the potential to adapt to different spaces and to the effects of climate change (Pantanella 2018; Milliken et al. 2022).

The use of aquaponic systems by refugees is an innovative strategy, both to obtain food and to generate income, preventing them from having

to leave outside the camps to find low-paid jobs that put them in danger (Hagen 2017; Obirikorang et al. 2021). The adaptation of aquaponic systems to any environment is positive for refugees in the following aspects: (1) the creation of jobs or forms of entrepreneurship, (2) income generation, (3) obtaining healthy products, (4) the use of aquaculture wastewater, and (5) the possible reuse of residual biomass to obtain energy (Hagen 2017; Hao et al. 2020; Cammies et al. 2021; Obirikorang et al. 2021).

Various projects have been carried out for people living in refugee camps, those who are in constant movement due to public insecurity or in places that are dangerous areas, and even in informal settlements. The British social enterprise Byspokes Community Interest Company (CIC) (<http://www.byspokes.org/>) through the pilot project “Development of aquaponic systems for space and water efficient food production in the Occupied Palestinian Territories (OPT)” seeks to provide a resource-efficient means of food production to the people of these areas (Viladomat and Jones 2011; Milliken and Stander 2019). As part of the results of the project, it was observed that the application of aquaponic systems can produce a variety of fresh and organically grown vegetables and fish while opening the opportunity to increase household income, considering the high level of unemployment in the areas of the OPT (17.2% in the West Bank, 37.8% in Gaza and has even reached 80% in some refugee camps) (Viladomat and Jones 2011).

In the same region, since 2010, the FAO, together with European donors, has implemented projects that integrate aquaponics, such as the “Emergency Food Production Support Project” for poor families in the Gaza Strip (Milliken and Stander 2019; Verner et al. 2017). Some 119 female-headed households were provided with innovative rooftop vertical units connected to fish tanks, enabling them to improve their food security and income while caring for their homes and children (Verner et al. 2017).

In the US, in response to violent crime on Buffalo’s Lower West Side, the Massachusetts Avenue Project (MAP) ([www.mass-ave.org/](http://www.mass-ave.org/)) began working on a food entrepreneurship

approach for youth to foster economic development and community participation (Metcalf and Widener 2011), creating more than 650 jobs for local youth through the creation of the Growing Green Program. In Seville, Spain, in response to long-term unemployment and a high incidence of drug-related crime, the social enterprise Asociación Verdes del Sur (<http://huertosverdesdelsur.blogspot.com>) built an aquaponic greenhouse on the grounds of a school in Polígono Sur, promoting the benefits of eating fresh local food and skills development (Milliken and Stander 2019).

On the African continent, around 24 countries have not been able to overcome their food crisis due to “extreme weather events, natural disasters, political instability and civil conflicts” (FAO 2015). In South Africa, aquaponic systems have been successfully implemented in response to increasing resource scarcity, food insecurity, the effects of climate change, urban poverty, and population growth, even in informal settlements. The systems have been proposed as a solution to keep a healthy environment with pressures from lack of water, population growth, and waste generation (Mchunu et al. 2018; Gichana et al. 2019; de Jager and Maserumule 2021). Although aquaponics represents a technology that can combat food insecurity in many African countries (Mchunu et al. 2018; Obirikorang et al. 2021), governments, decision makers and stakeholders must encourage its use to make it more frequent (Laidlaw and Magee 2016; Kledal and Thorarinsdottir 2018; Bich et al. 2020).

### **Aquaponics Promoting Alliances to Achieve the Objectives (SDG 17)**

To achieve the SDGs, alliances and cooperation are required at all levels, global, regional, national, and local; if achieved, it would benefit present and future generations. Aquaponics technology has proven to be useful in solving the problems that affect the current population and that will intensify in a few years. The field of aquaponics is growing internationally; scientific articles or official reports have been increasing through which the exchange of knowledge about its versatility has been achieved. In the present

study, academic publications from more than 50 countries and regions of the world were consulted with the purpose of contributing to food security, protecting the environment, achieving sustainability, as an educational tool, etc.

Collaborations are needed between aquaponics practitioners such as students, teachers, scientists, communities, and organizations from different countries, disseminating their findings in developed and developing countries. These collaborations have benefited from the support of public or private associations, or working together, such as the projects organized by the FAO in Palestinian territories or God's Country Waimānalo (GCW) in Hawaii, to educate and build skills in families, farmers, investors, and legislators (Verner et al. 2017; Abusin and Mandikiana 2020; Beebe et al. 2020).

Aquaponics has become popular in many parts of the world; it is considered a process innovation, opening access to different markets (König et al. 2016; Pantanella 2018; Fruscella et al. 2021). Palm et al. (2018), according to the classification of aquaponic systems, designated the type of market. In the case of the domestic aquaponics (DA), aquaponics for demonstration and urban services (UA), and aquaponics for demonstration and urban services type, they cover the "home use, direct sales, and education exhibition" markets, considering the types of commercial and industrial aquaponics infrastructures (IA), which include retail and wholesale. As has been reported, the location of farms or aquaponic companies in rural, peri-urban, or urban areas that allow the proximity of the products to the population allows faster access to markets, which is vital for rapid urbanization and population growth.

Aquaponics, by following the biomimetic principle, alludes to the circular economy, both at micro and macroeconomic levels (Wirza and Nazir 2021; Milliken et al. 2022). At the micro level, it integrates into urban cycles in accordance with the purposes of the blue and green infrastructure, as well as in closing the cycles of waste, resources, and energy (König et al. 2016; Milliken et al. 2022). In macroeconomics, this technology is integrated into the world economy with respect to present and current food demands while

making efficient use of water and energy, with the potential to adapt to the different conditions of the implementation sites and to the effects of climate change. It provides a form of employment or entrepreneurship that increases income that can be an important contribution to the Gross Domestic Product (GDP) of which agriculture represented 4.3% of the world's GDP and in developing countries it represented more than 20% of GDP in 2022 (The World Bank 2023c).

The increase in income that aquaponics practitioners have enjoyed is due to the efficiency of water or nutrients and the use of local inputs or materials, which provide profitability and compatibility and contribute to their economy and a better future for developing countries (Bich et al. 2020; Wirza and Nazir 2021). Aquaponics manages to be more profitable in the long term than conventional agriculture, with investment returns of 100% after 80 days (Sunny et al. 2019; Obirikorang et al. 2021).

Aquaponics systems have great potential for obtaining and increasing income, supplying the growing population, and tackling the deficiencies of the current agricultural sector, but this requires not only public acceptance but also the mobilization of financial resources and adequate policies for this emerging technology. For example, Cammies et al. (2021) propose an adjustment to earmarked grants so that aquaponic projects or facilities can qualify for the matching grants available, for example, from Environmental Land Management (ELM), the European Union (EU), CFP, Common Agricultural Policy (CAP), and Common Fisheries Policy (CFP) for the USA.

Some recommendations made to those responsible for urban policies and the government are that authorities should: (1) recognize aquaponics as a form of water management; (2) grant tax benefits, funds, or direct subsidies; (3) create a suitable marketing scheme for aquaponic products; (4) provide legislative support to reduce some of the barriers to its adoption; and (5) coordinate a plan to promote the qualities of aquaponics (Greenfeld et al. 2019; Subedi and Paudel 2020; Kaja et al. 2022). With the improvement in the coherence of policies to promote and develop aquaponic systems, it will be possible to

enjoy the advantages of their implementation, such as support for poverty reduction, food supply, promotion of inclusive and equitable trade, accessibility to different markets, etc.

König et al. (2016) proposed the following sustainability indicators based on the advantages offered by aquaponics: (a) water efficiency, (b) nutrient efficiency, (c) energy efficiency, (d) closed cycles, (e) decentralized production and local markets, (f) employment, (g) income, (h) food security, (i) urban development y social cohesion, (j) freshness and diet diversification and food sovereignty, and (k) education. The purpose was to measure progress in relation to sustainable development and the way aquaponics can contribute reaching the objectives of the 2030 Agenda.

## Future Directions

Aquaponics is a production system of aquatic and plant organisms that is based on the biomimetic principle, since it is mainly based on a natural cycle (nitrogen cycle) while efficiently using natural resources. The recirculation of water resources and nutrients reduces the pressure on the environment. In the same sense, aquaponic systems follow the principles of the circular economy, which benefits the micro and macro economies where this production system can be integrated into urban cycles in the form of blue and green infrastructure, and into cycles of waste, resources, and energy.

Its scalability and adaptability have allowed it to produce fresh and healthy food locally, both in cities and in rural areas, providing not only a high dietary diversity but also income, forging itself as a form of entrepreneurship and empowerment of young people, women, and people in a situation of physical and social vulnerability, reducing inequalities. It also reduces pressure on vegetation cover such as soil erosion, desertification, and soil contamination caused using pesticides, fertilizers, or chemicals from conventional agriculture. Aquaponic systems have promoted environmental awareness through education at all levels, as well as through tourism and community integration activities. Corporations and alliances have

been established at all levels with aquaponics through the dissemination and diffusion of the knowledge acquired in practice.

This system is growing in popularity as a type of sustainable agriculture with commercial, economic, financial, educational, environmental, personal, technological, food supply value, and political and regulatory potential. In this review, the SDGs were grouped into 12 sections, where the inevitable overlap of goals and benefits of the SDGs with respect to the implementation of aquaponic systems was observed in the process, making clear the essential that all goals work together, fulfilling precisely the ideals of the 2030 Agenda and what sustainable development represents. The benefits of this system still need to be further disseminated so that its products are accepted, and it becomes a common practice that will be a tool for obtaining food, health, and well-being for all people, generating decent employment, water sanitation, awareness, and environmental care.

## Bibliography

- Abusin SAA, Mandikiana BW (2020) Towards sustainable food production systems in Qatar: assessment of the viability of aquaponics. *Glob Food Secur* 25:100349. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100349>
- American Diabetes Association (ADV) (2021) The burden of diabetes in Hawaii. [diabetes.org/sites/default/files/2021-11/ADV\\_2021\\_State\\_Fact\\_sheets\\_Hawaii\\_rev.pdf](https://diabetes.org/sites/default/files/2021-11/ADV_2021_State_Fact_sheets_Hawaii_rev.pdf). Accessed 25 Jan 2023
- Antriyandarti E, Suprihatin D, Pangesti A, Samputra P (2024) The dual role of women in food security and agriculture in responding to climate change: Empirical evidence from Rural Java. *Environmental Challenges*, 14:100852. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100852>
- Aslinda BA, Niswaty R, Salam R (2019) Community empowerment in rural areas through the integration of business research learning industry. *Nat Volatiles Essent Oils* 8(4):14692–14704
- Atlason RS, Danner RI, Unnthorsson R, Oddsson GV, Sustaeta F, Thorarinsdottir R (2017) Energy return on investment for aquaponics: case studies from Iceland and Spain. *Biophys Econ Resour Qual* 2:1–12. <https://doi.org/10.1007/s41247-017-0020-5>
- Azad KN, Salam MA, Azad KN (2016) Aquaponics in Bangladesh: current status and future prospects. *J Biosci Agric Res* 7(2):669–677. <https://doi.org/10.18801/jbar.070216.79>
- Bakiu R, Taçi J, Nallani E, Kamberi E, Hala E, Sadiku E, Buda E (2020) The analyses of the medicinal plants

- growth in the integrated production system of aquaponics (experimental and commercial). *Albanian J Agric Sci* 19(3):40–44
- Beebe JK, Amshoff Y, Ho-Lastimosa I, Moayedi G, Bradley AL, Kim IN, Casson N, Protzman R, Espiritu D, Spencer MS, Chung-Do JJ (2020) Reconnecting rural native Hawaiian families to food through aquaponics. *Genealogy* 4(1):1–9
- Bich TTN, Yi-Ching C, Tri DQ, Khoa HD (2020) Applied aquaponics to culture high value local species and ultimately reused and recycle the local materials to build the green and sustainable agriculture. In: International conference on resources and environmental research 2019. IOP conference series: earth and environmental science 432 012008. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/432/1/012008>
- Braga B (2018) Water is a prerequisite for all development. *UN Chron* 55(1):41–43
- Breitenstein M, Hicks A (2022) Review and harmonization of the life cycle global warming impact of five United States aquaponics systems. *Aquac Eng* 96:102224. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102224>
- Camacho-Otero J, Boks C, Pettersen IN (2018) Consumption in the circular economy: a literature review. *Sustain For* 10(8):2758. <https://doi.org/10.3390/su10082758>
- Cammies C, Mytton D, Crichton R (2021) Exploring economic and legal barriers to commercial aquaponics in the EU through the lens of the UK and policy proposals to address them. *Aquac Int* 29(3):1245–1263. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00690-w>
- Cifuentes-Torres L, Correa-Reyes G, Mendoza-Espinosa LG (2021) Can reclaimed water be used for sustainable food production in aquaponics? *Front Plant Sci* 12:669984
- Clayborn J, Medina M, O'Brien G (2017) School gardening with a twist using fish: encouraging educators to adopt aquaponics in the classroom. *Appl Environ Educ Commun* 16(2):93–104. <https://doi.org/10.1080/1533015X.2017.1304837>
- Climent-Gil E, Aledo A, Vallejos-Romero A (2018) The social vulnerability approach for social impact assessment. *Environ Impact Assess Rev* 73:70–79
- Columbia Area Career Center (n.d.). Natural resources agriculture. <https://career-center.org/natural-resources-agriculture-3/>. Accessed 12 Apr 2022
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2015, October 20). Women live globally longer, healthier lives with better education, reveals new UN report. [www.cepal.org/en/noticias/mujeres-todo-mundo-viven-vidas-mas-largas-saludables-mejor-educacion-segun-se-revela-un](http://www.cepal.org/en/noticias/mujeres-todo-mundo-viven-vidas-mas-largas-saludables-mejor-educacion-segun-se-revela-un). Accessed 19 June 2022
- Costache M, Cristea D, Petrea S, Neculita M, Rahoveanu M, Simionov I, Modogan A, Sarpe D, Rahoveanu A (2021) Integrating aquaponics production systems into the Romanian green procurement network. *Land Use Policy* 108:105531. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105531>
- Croce S, Vettorato D (2021) Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: a catalogue of solutions. *Sustain Cities Soc* 1(75):103313. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103313>
- Danish MSS, Senjyu T, Sabory NR, Khosravy M, Grilli ML, Mikhaylov A, Majidi H (2021) A forefront framework for sustainable aquaponics modeling and design. *Sustain For* 13:9313. <https://doi.org/10.3390/su13169313>
- Darko A, Chan APC (2017) Review of barriers to green building adoption. *Sustain Dev* 25(3):167–179. <https://doi.org/10.1002/sd.1651>
- David LH, Pinho SM, Agostinho F, Costa JI, Portella MC, Keesman KJ, Garcia F (2022) Sustainability of urban aquaponics farms: an energy point of view. *J Clean Prod* 331:129896
- de Jager T, Maserumule MH (2021) Innovative community projects to educate informal settlement inhabitants in the sustainment of the natural environment. *Sustain For* 13:6238. <https://doi.org/10.3390/su13116238>
- Diatin I, Shafruddin D, Hude N, Sholihah MA, Mutsmir I (2021) Production performance and financial feasibility analysis of farming catfish (*Clarias gariepinus*) utilizing water exchange system, aquaponic, and biofloc technology. *J Saudi Soc Agric Sci* 20(5):344–351. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.04.001>
- Dos Santos MJPL (2016) Smart cities and urban areas—aquaponics as innovative urban agriculture. *Urban For Urban Green* 20(1):402–406. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.004>
- El-Essawy H, Nasr P, Sewilam H (2019) Aquaponics: a sustainable alternative to conventional agriculture in Egypt—a pilot scale investigation. *Environ Sci Pollut Res* 26(16):15872–15883. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04970-0>
- Endut A, Jusoh A, Ali NA, Wan Nik WB (2011) Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalin Water Treat* 32:422–430. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2761>
- Endut A, Lananan F, Jusoh A, Nik WNW, Ali N (2016) Aquaponics recirculation system: a sustainable food source for the future water conserves and resources. *Malays J Appl Sci* 1(1):1–12
- Entidad de las Naciones Unidas para la Igualdad de Género y el Empoderamiento de las Mujeres (ONU Mujeres) (2015). La igualdad de género. [mexico.unwomen.org/es/digiteca/publicaciones/2015/01/la-igualdad-de-genero#view](http://mexico.unwomen.org/es/digiteca/publicaciones/2015/01/la-igualdad-de-genero#view). Accessed 18 July 2022
- Escobar J (2002) La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. División de los recursos naturales e infraestructura. Cepal, Santiago de Chile. 68 p. [repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6411/S0210820\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6411/S0210820_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Accessed 13 July 2022
- FAO, PAHO, WFP and UNICEF (2018) Latin America and the Caribbean regional overview of food security

- and nutrition 2018 – inequality and food systems. FAO, OPS, WFP and UNICEF, Santiago
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2015, May 27). World hunger falls to under 800 million, eradication is next goal. [www.fao.org/africa/news/detail-news/en/c/289016/](http://www.fao.org/africa/news/detail-news/en/c/289016/). Accessed 10 Nov 2022
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2016) Urban agriculture in the Gaza Strip through vertical gardens and aquaponics. [www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/Fact\\_sheet\\_on\\_aquaponics\\_Final.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/Fact_sheet_on_aquaponics_Final.pdf). Accessed 14 Jan 2023
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017) Water for sustainable food and agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany. [www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf](http://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf). Accessed 15 Jan 2022
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018) The gender gap in land rights. [www.fao.org/3/18796EN/i8796en.pdf](http://www.fao.org/3/18796EN/i8796en.pdf). Accessed 14 July 2022
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2019, March 20) Water Scarcity—One of the greatest challenges of our time. [www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1185405/](http://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1185405/). Accessed 01 Aug 2023
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2020, September 15) COVID-19 impacts driving up acute hunger in countries already in food crisis. [www.fao.org/news/story/en/item/1307458/icode/](http://www.fao.org/news/story/en/item/1307458/icode/). Accessed 25 Oct 2022
- Forchino AA, Lourguioui H, Brigolin D, Pastres R (2017) Aquaponics and sustainability: the comparison of two different aquaponic techniques using the life cycle assessment (LCA). *Aquac Eng* 77:80–88. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.03.002>
- Fruscella L, Kotzen B, Milliken S (2021) Organic aquaponics in the European Union: towards sustainable farming practices in the framework of the new EU regulation. *Rev Aquac* 13(3):1661–1682. <https://doi.org/10.1111/raq.12539>
- Fukuda-Parr S (2016) From the millennium development goals to the sustainable development goals: shifts in purpose, concept, and politics of global goal setting for development. *Gend Dev* 24(1):43–52. <https://doi.org/10.1080/13552074.2016.1145895>
- Genello L, Fry JP, Frederick JA, Li X, Love DC (2015) Fish in the classroom: a survey of the use of aquaponics in education. *Eur J Health Biol Educ* 4(2): 9–20. <https://doi.org/10.20897/lectito.201502>
- Gichana Z, Liti D, Wakibia J, Ogello E, Drexler S, Meulenbroek P, Ondiba R, Zollitsch W, Waidbacher H (2019) Efficiency of pumpkin (*Cucurbita pepo*), sweet wormwood (*Artemisia annua*) and amaranth (*Amaranthus dubius*) in removing nutrients from a small-scale recirculating aquaponic system. *Aquac Int* 27:1767–1786. <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00442-x>
- Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustain For* 7(4):4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Greenfeld A, Becker N, McIlwain J, Fotedar R, Bornman JF (2019) Economically viable aquaponics? Identifying the gap between potential and current uncertainties. *Rev Aquac* 11(3):848–862
- Greenfeld A, Becker N, Bornman JF, Dos Santos MJ, Angel D (2020) Consumer preferences for aquaponics: a comparative analysis of Australia and Israel. *J Environ Manag* 257:109979. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109979>
- Hagen TP (2017) Creating global cities of refuge: moonshot innovation for refugee well-being. *J Soc Res Policy* 8(1):33–53
- Hao Y, Ding K, Xu Y, Tang Y, Liu D, Li G (2020) States, trends, and future of aquaponics research. *Sustain For* 12(18):7783
- Hart ER, Webb JB, Danylchuk AJ (2013) Implementation of aquaponics in education: an assessment of challenges and solutions. *Sci Educ Int* 24(4):460–480
- Hart ER, Webb JB, Hollingsworth C, Danylchuk AJ (2014) Managing expectations for aquaponics in the classroom: enhancing academic learning and teaching an appreciation for aquatic resources. *Fisheries* 39(11): 525–530
- Hawai'i Health Matters (2023) Coronary heart disease death rate. [www.hawaiihealthmatters.org/indicators/index/view?indicatorId=1248&localeId=14](http://www.hawaiihealthmatters.org/indicators/index/view?indicatorId=1248&localeId=14). Accessed 15 July 2023
- Hoevenaars K, Junge R, Bardocz T, Leskovec M (2018) EU policies: new opportunities for aquaponics. *Ecocycles* 4(1):10–15
- Huang C-C, Lu H-L, Chang Y-H, Hsu T-H (2021) Evaluation of the water quality and farming growth benefits of an intelligence aquaponics system. *Sustain For* 13: 4210. <https://doi.org/10.3390/su13084210>
- Jacobs-McDaniels NL (2014) Aquaponics education in the community college setting. *Ann Aquac Res* 1(1):1005
- Junge R, König B, Villarrol M, Komives T, Jijakli MH (2017) Strategic points in aquaponics. *Water* 9(182):1–9
- Kaja S, Veeramani R, Tanveer M (2022) In: Rao CM, Patra KC, Jhajharia D, Kumari S (eds) A conceptual approach toward water management with aquaponics. Advanced modelling and innovations in water resources engineering. Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4_23)
- Kledal PR, Thorarinsdottir R (2018) Aquaponics: a commercial niche for sustainable modern aquaculture. In: Hai FI, Visvanathan C, Boopathy R (eds) Sustainable aquaculture. Springer, Cham
- König B, Junge R, Bittsanszky A, Villarrol M, Kömives T (2016) On the sustainability of aquaponics. *Ecocycles* 2(1):26–32
- König B, Janker J, Reinhardt T, Villarrol M, Junge R (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *J Clean Prod* 180:232–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.037>
- Kuran CHA, Morsut C, Kruke BI, Krüger M, Segnestam L, Orru K, Nævestad TO, Airola M, Keränen J, Gabel F,

- Hansson S, Torpan S (2020) Vulnerability and vulnerable groups from an intersectionality perspective. *Int J Disaster Risk Reduct* 50:101826. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101826>
- Laidlaw J, Magee L (2016) Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne. *Local Environ* 21(5):573–590. <https://doi.org/10.1080/13549839.2014.986716>
- Li C, Lee CT, Gao Y, Hashim H, Zhang X, Wu WM, Zhang Z (2018) Prospect of aquaponics for the sustainable development of food production in urban. *Chem Eng Trans* 63:475–480
- Love DC, Fry JP, Genello L, Hill ES, Frederick JA, Li X, Semmens K (2014) An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One* 9(7):e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Mchunu N, Lagerwall G, Senzanje A (2017) Food sovereignty for food security, aquaponics system as a potential method: a review. *J Aquac Res Dev* 497:1–9. <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000497>
- Mchunu N, Lagerwall G, Senzanje A (2018) Aquaponics in South Africa: results of a national survey. *Aquac Rep* 12:12–19. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2018.08.001>
- Metcalf S, Widener M (2011) Growing Buffalo's capacity for local food: a systems framework for sustainable agriculture. *Appl Geogr* 31(4):1242–1251. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.01.008>
- Milliken S, Stander H (2019) In: Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM (eds) *Aquaponics and social enterprise. Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production Technologies for the Future*. Springer International Publishing, pp 607–619. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_24)
- Milliken S, Ovca A, Antenen N, Villarroel M, Bulc TG, Kotzen B, Junge R (2021) *Aqu@ teach*—the first aquaponics curriculum to be developed specifically for university students. *Horticulturae* 7(2):18. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7020018>
- Milliken S, Ovca A, Villarroel M, Gartmann F, Antenen N, Bulc TG, Kotzen B, Junge R (2022) Lessons learned from introducing aquaponics to higher education curricula. In: Vasconcelos C, Calheiros CSC (eds) *Enhancing environmental education through nature-based solutions, Integrated science, vol 4*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91843-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91843-9_11)
- Monroe MC, Andrews E, Biedenweg K (2008) A framework for environmental education strategies. *Appl Environ Educ Commun* 6(3–4):205–216. <https://doi.org/10.1080/15330150801944416>
- Morseletto P (2020) Targets for a circular economy. *Resour Conserv Recycl* 153:104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Mukhtarova M, Kolokolova N (2018) Aquaponics: the way to create a living ecosystem on biology lessons. Язык и межкультурная коммуникация [Текст]: Сборник статей XI международной, 186–190
- Nelson R (2007) Ten great examples of aquaponics in education. *Aquaponics Journal* 46:18–21. <https://aquaponics.com/wp-content/uploads/articles/Ten-Great-Examples-of-Aquaponics-in-Education.pdf>. Accessed 26 Jun 2024
- Obirikorang KA, Sekey W, Gyampoh BA, Ashiagbor G, Asante W (2021) Aquaponics for improved food security in Africa: a review. *Front Sustain Food Syst* 5:1–10. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.705549>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 22 de marzo de 2012. Día Mundial del Agua: se requieren 15.000 litros de agua para generar un kilo de carne, señala la FAO. [www.fao.org/americas/noticias/ver/en/c/229495/](http://www.fao.org/americas/noticias/ver/en/c/229495/). Accessed 15 Mar 2022
- Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Haïssam Jijakli M, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquac Int* 26: 813–842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Pantarella E (2018) Aquaponics production, practices and opportunities. In: *Sustainable aquaculture*. Springer, Cham, pp 191–248
- Rahdriawan M, Wahyono H, Yuliastuti N, Ferniah RS (2019) Sustainable urban farming through community based aquaponics case: Kandri Village, Semarang. *ASSEHR* 216:107–117
- Rana S, Bag SK, Golder D, Roy SM, Pradhan C, Jana BB (2011) Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants. *Ecol Eng* 37(6): 981–988. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.01.009>
- Rigolot C, Quantin M (2022) Biodynamic farming as a resource for sustainability transformations: potential and challenges. *Agric Syst* 200:103424. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103424>
- Roosta HR (2014) Comparison of the vegetative growth, ecophysiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic: aquaponic solutions. *J Plant Nutr* 37(11): 1782–1803. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.890220>
- Rukmana D (2014) Vulnerable populations. In: Michalos AC (ed) *Encyclopedia of quality of life and well-being research*. Springer, Dordrecht, pp 6989–6992
- Sarfraz U (2020) Review on aquaponics system as a sustainable food production source. *Lahore Garrison Univ J Life Sci* 4(04):330–348. <https://doi.org/10.54692/lgujls.2020.0404128>
- Schneller AJ, Schofield CA, Frank J, Hollister E, Mamuszka L (2015) A case study of indoor garden-based learning with hydroponics and aquaponics: evaluating pro-environmental knowledge, perception, and behavior change. *Appl Environ Educ Commun* 14(4):256–265. <https://doi.org/10.1080/1533015X.2015.1109487>
- Shah M, Saad A (2020) Smart aquaponics systems for urban farming. *J Tech* 5(2):82–87
- Simorangkir RTMC (2018) Implementation of an aquaponics at Kelurahan Kembangan Selatan. *ICCD* 1(1):667–682. <https://doi.org/10.33068/iccd.Vol1.Iss1.99>

- Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO
- Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2022) Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala—Cultivo integral de peces y plantas. FAO
- Stuart E, Woodroffe J (2016) Leaving no-one behind: can the sustainable development goals succeed where the millennium development goals lacked? *Gend Dev* 24(1):69–81. <https://doi.org/10.1080/13552074.2016.1142206>
- Subedi B, Paudel M (2020) Aquaponics: prospects and challenges in Nepal. *Int J Environ Agric Biotechnol* 5(4):1182–1186. <https://doi.org/10.22161/ijeb.54.39>
- Sunny AR, Islam MM, Rahman M, Miah MY, Mostafiz M, Islam N, Hossain MZ, Chowdhury MA, Islam MA, Keus JH (2019) Cost effective aquaponics for food security and income of farming households in coastal Bangladesh. *Egypt J Aqua Res* 45(1):89–97. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.01.003>
- The Island School (2021) Summer Apprentices: collaboration with Young Leaders. <https://islandschool.org/news/the-island-school/2021-8-9-summer-apprentices-opportunities-amp-collaboration-with-young-leaders/>. Accessed 10 Apr 2022
- The World Bank (2021) Population, total. [data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL](https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL). Accessed 30 Nov 2022
- The World Bank (2022, September 14). Poverty. [www.worldbank.org/en/topic/poverty/overview#1](https://www.worldbank.org/en/topic/poverty/overview#1). Accessed 16 Sept 2022
- The World Bank (2023a, October 26). Aquaculture production (metric tons). [data.worldbank.org/indicator/ER.FSH.AQUA.MT](https://data.worldbank.org/indicator/ER.FSH.AQUA.MT). Accessed 29 Nov 2023
- The World Bank (2023b, October 26). Population, total. [data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL](https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL). Accessed 29 Nov 2023
- The World Bank (2023c, June 29). Agriculture, forestry, and fishing, value added (% of GDP). [www.worldbank.org/en/topic/poverty/overview#1](https://www.worldbank.org/en/topic/poverty/overview#1). Accessed 20 July 2023
- Tomlinson L (2017) Indoor aquaponics in abandoned buildings: a potential solution to food deserts. *Sustain Dev Law Policy* 16(1):5
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2022, July 28) What is environmental education? [www.epa.gov/education/what-environmental-education](https://www.epa.gov/education/what-environmental-education). Accessed 14 Nov 2022
- United Nations (UN) (2017, June 21). World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100. [www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html](https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html). Accessed 15 Apr 2022
- United Nations (UN) (2018) Gender equality: why it matters [www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-5.pdf](https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-5.pdf). Accessed 20 Oct 2022
- United Nations (UN) (2019, May 10). Ensuring the ‘lungs of the planet’ keep us alive: 5 things you need to know about forests and the UN. [news.un.org/en/story/2019/05/1038291](https://news.un.org/en/story/2019/05/1038291). Accessed 14 Nov 2022
- United Nations (UN) (2020a, April 5). First person: COVID-19 is not a silver lining for the climate, says UN Environment chief. [news.un.org/en/story/2020/04/1061082](https://news.un.org/en/story/2020/04/1061082). Accessed 14 Nov 2022
- United Nations (UN) (2020b) No poverty: why it matters. [www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2016/08/1\\_Why-It-Matters-2020.pdf](https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2016/08/1_Why-It-Matters-2020.pdf). Accessed 14 Nov 2022
- United Nations (UN) (2021a, March 22). El agua es la base de la vida, pero está fuera del alcance de 2000 millones de personas. [news.un.org/es/story/2021/03/1489832#:~:text=Imprimir%20Correo%20electr%C3%B3nico-,E1%20agua%20es%20la%20base%20de%20la%20vida%2C%20pero%20est%C3%A1,de%202000%20millones%20de%20personas&text=E1%20agua%20es%20un%20recurso,grandes%20desaf%C3%ADos%20demogr%C3%A1ficos%20y%20clim%C3%A1ticos](https://news.un.org/es/story/2021/03/1489832#:~:text=Imprimir%20Correo%20electr%C3%B3nico-,E1%20agua%20es%20la%20base%20de%20la%20vida%2C%20pero%20est%C3%A1,de%202000%20millones%20de%20personas&text=E1%20agua%20es%20un%20recurso,grandes%20desaf%C3%ADos%20demogr%C3%A1ficos%20y%20clim%C3%A1ticos). Accessed 11 Sept 2022
- United Nations (UN) (2021b, June 2). COVID crisis to push global unemployment over 200 million mark in 2022. [news.un.org/en/story/2021/06/1093182](https://news.un.org/en/story/2021/06/1093182). Accessed 14 Nov 2022
- United Nations (UN) (2022, January 27). Sube la extrema pobreza en america latina a niveles no vistos en casi 30 años. [news.un.org/es/story/2022/01/1503172](https://news.un.org/es/story/2022/01/1503172). Accessed 14 Nov 2022
- United Nations (UN) (n.d.) Six climate-positive actions to help rebuild economies from COVID-19 pandemic. [www.un.org/en/climatechange/recovering-better/six-climate-positive-actions](https://www.un.org/en/climatechange/recovering-better/six-climate-positive-actions). Accessed 27 Sept 2022
- United Nations Development Programme (UNDP) (2023). Women as Agents of Change for Greening Agriculture and Reducing Gender Inequality. <https://www.undp.org/publications/dfs-women-agents-change-greening-agriculture-and-reducing-gender-inequality>. Accessed 27 Jun 2024
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2019) The United Nations world water development report 2019: leaving no one behind, facts and figures. [unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276). Accessed 13 Mar 2022
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2016) <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/half-world-face-severe-water-stress-2030-unless-water-use-decoupled>. Accessed 28 Jun 2024
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2021, April 29). Ocean and climate change dialogue to consider how to strengthen adaptation and mitigation action Informal summary report by the Chair of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. [unfccc.int/sites/default/files/resource/SBSTA\\_Ocean\\_Dialogue\\_SummaryReport.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/SBSTA_Ocean_Dialogue_SummaryReport.pdf). Accessed 02 Nov 2022
- United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR) (2022) Global trends report. [www.unhcr.org/62a9d1494/global-trends-report-2021](https://www.unhcr.org/62a9d1494/global-trends-report-2021). Accessed 01 July 2022
- Verner D, Vellani S, Klausen A-L, Tebaldi E (2017) Frontier agriculture for improving refugee livelihoods:

- unleashing climate-smart and water-saving agriculture technologies in MENA. [openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29753/RWSAT-AUS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29753/RWSAT-AUS.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Accessed 12 Jan 2022
- Viladomat L, Jones P (2011) Development of aquaponic systems for space and water efficient food production. [http://www.byspokes.org/wp-content/uploads/documents/basma\\_report.pdf](http://www.byspokes.org/wp-content/uploads/documents/basma_report.pdf). Accessed 01 Oct 2022
- Villarroel M, Junge R, Komives T, König B, Plaza I, Bittsánszky A, Joly A (2016) Survey of aquaponics in Europe. *Water* 8(468):1–9. <https://doi.org/10.3390/w8100468>
- Wirza R, Nazir S (2021) Urban aquaponics farming and cities—a systematic literature review. *Rev Environ Health* 36(1):47–61
- Wongkiew S, Popp BN, Kim HJ, Khanal SK (2017) Fate of nitrogen in floating-raft aquaponic systems using natural abundance nitrogen isotopic compositions. *Int Biodeterior Biodegrad* 125:24–32. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.08.006>
- World Health Organization (WHO) (2018) Millennium Development Goals (MDGs), 19 de febrero de 2018. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/millennium-development-goals-\(mdgs\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/millennium-development-goals-(mdgs)). Accessed 20 Nov 2022
- World Meteorological Organization (WMO) (2022) State of the global climate 2021. [library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=11178](http://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178). Accessed 01 Nov 2022
- Wu F, Ghamkhar R, Ashton W, Hicks A (2019) Sustainable seafood and vegetable production: aquaponics as a potential opportunity in urban areas. *Integrated Environmental Assessment and Management* 15(6):832–843. <https://doi.org/10.1002/icam.4187>
- Yanes AR, Martinez P, Ahmad R (2020) Towards automated aquaponics: a review on monitoring, IoT, and smart systems. *J Clean Prod* 263:121571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>
- Zimmermann M, Fischer M (2020) Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian belief networks. *J Water Reuse Desalination* 10(4):431–442. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.026>

### Complementary References

- Baganz GF, Junge R, Portella MC, Goddek S, Keesman KJ, Baganz D, Staaks G, Shaw C, Lohrberg F, Kloas W (2022) The aquaponic principle—it is all about coupling. *Rev Aquac* 14(1):252–264. <https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Diehl JA, Kaur H (eds) (2021) *New forms of urban agriculture: an urban ecology perspective*. Springer Nature Singapore, p 346. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3738-4>
- Dos Santos MJPL (2018) Nowcasting and forecasting aquaponics by Google trends in European countries. *Technol Forecast Soc Chang* 134:178–185. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.002>
- Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM (2019) *Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer Nature, p 619. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- Hai FI, Visvanathan C, Boopathy R (eds) (2018) *Sustainable aquaculture*, 1st edn. Springer International Publishing, p 327. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2>
- Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC, Khanal SK (2015) Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresour Technol* 188:92–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>
- Yang T, Kim HJ (2019) Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Sci Hortic* 256:108619. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108619>
- Yavuzcan Yildiz H, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—a review. *Water* 9(1):13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>

## **CAPÍTULO III: APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TRATADAS DOMÉSTICAS EN UN SISTEMA DE ACUAPONÍA**

### **Acuaponía: Agua residual tratada doméstica vs agua dulce, un caso de estudio**

**Muñoz-Euán, Nayla<sup>1</sup>, Mendoza-Espinosa, Leopoldo<sup>1</sup>, Correa-Reyes, Juan Gabriel<sup>1</sup>, Jiménez-Ramírez, Cesar<sup>2</sup>, Rosales-Leija, Misael<sup>3</sup>, Barreto-Curiel, Fernando<sup>2</sup>, García-Gastelum, Alejandro<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>3</sup>Departamento de Acuicultura. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México

#### **Resumen**

La creciente escasez de agua a nivel mundial ha impulsado la búsqueda de fuentes alternativas, entre ellas el uso de aguas residuales, especialmente en la agricultura, que consumen más del 70% del agua dulce y residual disponible globalmente. Frente a esta situación, se han implementado técnicas agrícolas que optimizan el uso de este recurso, destacando la acuaponía, un sistema integrado de hidroponía y acuicultura. En este contexto, el uso de aguas residuales tratadas en cultivos de plantas y peces ornamentales se presenta como una alternativa sostenible, sin comprometer la salud humana al limitar su aplicación a especies no comestibles.

Este estudio evaluó el uso de “agua dulce (FW)” y “agua residual tratada doméstica (DW)” en un sistema acuapónico ornamental, realizado en el domo geodésico de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California, en Ensenada. Durante 40 días, se probaron cuatro tratamientos experimentales: T1 – FW (FW sin nutrientes), T2 – FN (FW con nutrientes), T3 – DW (DW sin nutrientes adicionales) y T4 – DN (DW con nutrientes adicionales). Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas de ambos tipos de agua y de los tratamientos, midiendo parámetros como pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), salinidad y oxígeno disuelto (OD), junto con nutrientes específicos como fósforo, sulfatos, azufre, nitrógeno de nitrato (N-NO<sub>3</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>).

Para evaluar la respuesta biológica, se midieron el crecimiento y desarrollo de peces en términos de ganancia de peso y tasas de crecimiento, así como atributos morfológicos de las plantas, como el peso fresco y seco, fracción de masa de raíz (RMF) y el Índice de contenido de clorofila (ICC). Los datos fueron analizados estadísticamente para verificar diferencias significativas entre los tratamientos mediante ANOVA y pruebas de Tukey.

Los resultados mostraron que, en todos los tratamientos y tipos de agua, los valores de temperatura y concentración de  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{NO}_3$  no tuvieron diferencias significativas, aunque el pH y el OD fueron más altos en FW. Las muestras de DW presentaron mayores valores de salinidad, SDT y CE. Además, nutrientes como el fósforo, sulfatos y azufre estuvieron más concentrados en DW, mientras que TAN y  $\text{NH}_3$  estuvieron ausentes en FW, pero se mantuvieron constantes en DW durante todo el experimento. La tasa de remoción de TAN promedio en T3 – DW ( $99.48 \pm 0.16\%$ ) y T4 – DN ( $98.97 \pm 0.18 \%$ ), fue más alta a otros experimentos observados en bibliografía.

En las plantas, el tipo de agua y la adición de nutrientes influyen significativamente en algunos nutrientes específicos. Al finalizar el estudio, T1 – FW (FW sin nutrientes) mostró la mayor supervivencia de peces, aunque el tratamiento T2 – FN (FW con nutrientes) registró el crecimiento absoluto y la ganancia en peso más alta. En el caso de los girasoles, se observará un crecimiento favorable en altura y biomasa en T3 – DW y T4 – DN, mientras que en T1 – FW las plantas no se desarrollaron, terminando marchitas.

Este estudio resalta el potencial de la DW para el cultivo de plantas ornamentales en acuaponía, en particular para girasoles, aprovechando los nitratos generados por las excretas de peces y los nutrientes añadidos en algunos tratamientos. Sin embargo, el uso de DW requiere biofiltros efectivos y un control de pH entre 6.5 y 7.0 para minimizar efectos adversos en el sistema. Aunque no se detectan niveles críticos de metales en DW, se recomienda realizar pruebas adicionales y considerar el uso de girasoles como estrategia de fitorremediación para la posible absorción de metales.

En conclusión, el uso de aguas residuales tratadas en sistemas de acuaponía ornamental se presenta como una opción eficiente, favoreciendo el crecimiento de plantas sin efectos negativos significativos en peces, aunque se requiere más investigación para evaluar su bienestar en estos sistemas.

**Palabras clave:** acuaponía, aguas residuales tratadas, agricultura sostenible, reutilización de agua, aprovechamiento de nutrientes.

## Introducción

La creciente escasez de agua a nivel mundial ha llevado a considerar fuentes alternativas de agua, como el uso de aguas residuales. La reutilización de aguas residuales, ya sean crudas o tratadas, se ha popularizado como una fuente complementaria de agua dulce para el desarrollo urbano, procesos industriales, actividades domésticas, suministro de agua potable y agricultura (Akpan et al., 2020; Faria y Naval, 2022; Msaki et al., 2022). La agricultura es el principal sector que demanda la mayor cantidad disponible tanto aguas residuales como agua dulce (Winpenny et al., 2013; Rusănescu et al., 2022). Del total del agua dulce que se extrae a nivel mundial, del 70 – 85 % se utiliza en actividades agrícolas (Winpenny et al., 2013; Zimmermann & Fischer, 2020; Rusănescu et al., 2022).

En los últimos años, se han vuelto más populares las técnicas agrícolas que permiten ahorrar agua y hacer un uso racional de este recurso. Un ejemplo de ello es la hidroponía que es un sistema de producción de plantas ornamentales y comestibles que se cultivan con una solución nutritiva, prescindiendo del suelo (Pritsa et al., 2008; Haddad & Mizyed, 2011). Por otro lado, la acuaponía es un sistema de producción de plantas (hidroponía) basado en la recirculación del agua al que se le integra la acuicultura, su origen se concede de la agricultura sostenible (Tomlinson, 2017; Colorado y Ospina, 2019).

En los sistemas de acuaponía se usa eficientemente el agua y los nutrientes. Los nutrientes principales se obtienen de las excretas de los organismos acuáticos. Las bacterias nitrificantes a través de un biofiltro metabolizan los desechos de los peces convirtiéndolos en nutrientes que aprovechan las plantas para su crecimiento y desarrollo, evitando que se concentren formas nocivas de nitrógeno, como el  $\text{NH}_3$  y el nitrito (Somerville et al., 2014; Junge et al., 2017; Li et al., 2018). Las plantas absorben los nutrientes, actuando como un biofiltro, lo que permite que el agua recircule de mejor calidad, promoviendo a este proceso como una etapa complementaria de tratamiento de aguas residuales (El-Essawy et al., 2019; Adhikari et al., 2020).

Considerando la protección de la salud humana, una estrategia adecuada para el aprovechamiento de aguas residuales en un sistema acuapónico podría, inicialmente, enfocarse en el cultivo de especies de interés comercial como plantas ornamentales (Saidi et al., 2012). No obstante, es fundamental analizar tanto las características de las aguas residuales como de los organismos vegetales y acuáticos involucrados. Para el reúso de las aguas residuales, es esencial evaluar su calidad mediante el análisis de diversos parámetros fisicoquímicos, con el fin de monitorear y minimizar los riesgos para los organismos cultivados. Sin embargo, se necesitan más

estudios que aporten información sobre el uso de aguas residuales para el cultivo de organismos acuáticos. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el uso de dos tipos de agua, “Aguas Residuales Tratadas de origen doméstico (DW)” y “Agua dulce (FW), en el cultivo de acuaponía ornamental.

### ***Panorama general del uso de aguas residuales en la agricultura***

Para el año 2025 se prevé que al menos la mitad de la población mundial viva en zonas con escasez de agua y de continuar con esa tendencia, para el año 2040 el aumento de la demanda mundial de este recurso podría ascender en más del 50% (OMS, 2019; ONU 2021). Ante la situación se ha adoptado por el reúso de aguas residuales, que históricamente no es una práctica nueva, sino que se remonta a la Edad de Bronce (3200-1100 a. C.) (Jaramillo y Restrepo, 2017).

En la actual Pakistán, la cultura del Valle del Indo usaba avanzados sistemas de alcantarillado y drenaje desde el 2600 a. C. y en la ciudad de Harappa a través de la conexión de los desagües locales a alcantarillas se transportaban las aguas residuales para su uso en actividades agrícolas (Angelakis et al., 2018). Durante el período Clásico en Grecia, las aguas residuales de los baños públicos y las residencias, así como las aguas pluviales eran transportadas por conductos revestidos de ladrillos hasta el área de Elaionas, Grecia, donde se regaban y fertilizaban huertos y cultivos extensivos (Jaramillo y Restrepo, 2017; Angelakis et al., 2018).

En el siglo III, la ciudad de Shibam, Yemen, se diseñó para disponer las aguas residuales para el riego y fertilización de cultivos (Angelakis et al., 2018). Ya en la época medieval (ca. 330-1400 d. C.) no hubo grandes avances con respecto a la tecnología y el conocimiento del agua, ya que los esfuerzos se focalizaron a las guerras, teniendo como resultado la muerte de al menos el 25% de la población en Europa debido a enfermedades transmitidas por el agua (Angelakis et al., 2018). Sin embargo, no fue hasta el siglo XIX tras las grandes epidemias a lo largo del mundo que las prácticas de saneamiento resurgieron y el reúso de agua se retomó y se extendió a países de América, Europa, Oceanía y Asia (Silva et al., 2008; Angelakis et al., 2018).

En tiempos actuales, desde hace más de 50 años a la fecha, la autoridad principal para facilitar el uso de Aguas Residuales Tratadas (ART) en agricultura ha sido la Organización Mundial de la Salud (OMS), la que elaboró el documento “Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Public Health Safeguards”, donde se establece la importancia del reúso de estos efluentes y al mismo tiempo su relación con los posibles peligros específicos para la salud humana (OMS, 1973). Este documento ha servido de guía para diferentes normatividades que han proporcionado puntos

clave para la gestión y aplicación de las aguas residuales en la agricultura (Jaramillo y Restrepo, 2017).

### ***Reúso de las aguas residuales en Ensenada, B.C.***

El estado de B.C. se encuentra en el lugar número 11 a nivel nacional de los estados más poblados en México, con un registro de 3'769,020 personas (INEGI, 2021). La población del estado se abastece de agua a través de fuentes superficiales y subterráneas. El grado de presión de la Región Hidrológica Administrativa I (Península de Baja California) en el 2017 fue de 81.3% y se prevé que para el año 2030 aumente a 95.4%. Para ese año, se requerirán nuevas fuentes de aprovisionamiento de agua (CONAGUA, 2018; Cortés-Ruiz & Azuz-Adeath, 2021). No obstante, las lluvias en B.C. son muy escasas, alrededor de 200 mm de precipitación total anual (INEGI, 2021), un 72% menos que el promedio a nivel nacional (722.5 mm, CONAGUA, 2021).

Para coadyuvar a la escasez de agua en B.C. una de las acciones que se realiza es la desalación de agua de mar, situación que crea a su vez el uso ineficiente de las fuentes existentes como lo son las ART (Waller-Barrera *et al.*, 2009; Navarro-Chaparro *et al.*, 2016; Elizondo y Mendoza-Espinosa, 2020). En B.C., el principal propósito propuesto para el reúso de las ART es en actividades agrícolas. Esto se debe a que, actualmente, aproximadamente el 87% del agua dulce o potable asignada al estado se destina a la agricultura, representando una oportunidad estratégica para optimizar el uso de los recursos hídricos y reducir la presión sobre las fuentes de agua potable. (Waller-Barrera *et al.*, 2009; Cortés-Ruiz & Azuz-Adeath, 2021).

El municipio de Ensenada, B.C. posee una extensión territorial superior a los 19 mil kilómetros, es una región predominantemente árida que se abastece de agua principalmente de acuíferos, donde algunos ya presentan la condición de sobreexplotados lo que encamina a la necesidad de identificar estrategias para satisfacer sobre todo a la actividad más demandante de este recurso “la agricultura” (Medellín-Azuara *et al.*, 2008; Mendoza-Espinosa y Daesslé, 2018; Gobierno de Ensenada, 2021a).

Con base en lo anterior se han pronunciado investigaciones acerca del reúso de las ART en el municipio de Ensenada, B.C. En el 2004 se resalta a la ciudad de Ensenada como aquella de las pocas ciudades de México que trata todas las aguas residuales que genera y que a su vez cumplen con las normas mexicanas (Mendoza-Espinosa *et al.*, 2004). El estudio de Mendoza-Espinosa *et al.* (2004) se centró en la planta de tratamiento (PTAR) de “El Naranjo”, donde se observó que sus efluentes pueden ocuparse para cultivos de consumo humano indirecto y/o para la recarga de

acuíferos, sin embargo, se destaca la necesidad del trabajo en colaboración del gobierno, ONG's y las comunidades académicas y científicas para un reúso responsable de las ART en Ensenada.

A través del modelo de optimización (CALVIN) la recuperación y reutilización de ART para la ciudad se considera como la alternativa que mejor se adecua en términos económicos para satisfacer las necesidades futuras de agua, dejando de lado opciones como la desalinización de agua de mar de manera individual (Medellín-Azuara et al., 2007). Waller-Barrera et al. (2009) usaron el modelo *Baja Calvin* descartando la desalación del agua de mar y la sobreexplotación de acuíferos como las opciones económicamente viables para abastecimiento urbano, fortaleciendo la opción de reúso de agua como promotora de menor escasez, menor costo de escasez y alternativas para el abastecimiento de agua en actividades agrícolas.

Un ejemplo de aplicación de ART en actividades agrícolas en el Valle de Guadalupe se documenta en Mendoza-Espinosa et al. (2008) y Acosta-Zamorano et al. (2013), donde se evaluó el desarrollo y calidad de los cultivos de las vides *Vitis Vinifera L. Cv., Cabernet Sauvignon y Merlot, Vitis inífera var. Tempranillo*, respectivamente. No se observaron efectos negativos en los cultivos de ambos estudios, en Mendoza-Espinosa et al. (2008) se observó un aumento en la producción de uva por planta de al menos un 20% y un mayor crecimiento de los cultivos durante un mayor periodo de tiempo, sin representar un riesgo para la salud.

Acosta-Zamorano et al. (2013) encontraron un buen rendimiento de fruta y madera, así como en la fotosíntesis de la vid, sugiriendo que el uso de las ART puede implementarse de forma segura como suplemento hídrico en estos tipos de cultivo.

Rojas-Remis y Mendoza-Espinosa (2015), analizaron los procesos de las PTAR a través del uso de los sistemas complejos, lo que permitió la descripción de externalidades positivas con respecto a las acciones de los actores en el sistema de tratamiento de aguas residuales, donde se destaca como propuesta estos efluentes para el riego de cultivos agrícolas, jardines ornamentales e infiltración de mantos acuíferos.

En el 2014, después de años de negociación se logró consolidar el uso de las ART de la PTAR de El Naranjo en el Valle de Maneadero para el riego de forrajes y flores y descarga a los arroyos secos San Carlos y Las Ánimas. Este estudio representa un antecedente para destacar los desafíos, en lo técnico mencionando lo que debe monitorearse y controlarse, sin embargo, en cuanto a las cuestiones sociales y políticas aún se requieren más compromisos entre los sectores interesados, este es un ejemplo para sitios que enfrentan situaciones similares (Mendoza-Espinosa y Daesslé, 2018). De junio de 2014 a noviembre de 2015 se reutilizaron más de 3'177,000 m<sup>3</sup> de ART de la PTAR de

El Naranjo, para el riego de más de cien hectáreas de forraje y flor, evitando con esto la extracción de agua del acuífero para el riego y generando más de 1 550 empleos (SECTUR, 2018).

En años posteriores las investigaciones acerca de las ART se centraron en las normativas relacionadas (NOM-127-SSA1-1994, NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997, NOM-179-SSA1-1998, NOM-230-SSA1-2002, entre otras) para su uso responsable en riego agrícola y recarga de acuíferos, que como se ha observado sus beneficios van desde los ambientales (disminuyendo la sobreexplotación y previniendo la intrusión de agua de mar) y económicos (ahorro en la producción de cultivos) (Gilabert-Alarcón et al., 2018). Elizondo y Mendoza-Espinosa (2020) sugieren que las aguas residuales de las PTAR de “El Sauzal, Noreste, El Gallo y El Naranjo” tienen la calidad adecuada para la infiltración al acuífero e irrigación agrícola en Valle de Guadalupe y Valle de Maneadero. Desde un punto de vista ambiental y económico, el reúso de estos efluentes es una alternativa más apropiada en cuanto a costo-beneficio (Elizondo y Mendoza-Espinosa, 2020).

En los últimos años, las aguas residuales de la PTAR El Gallo han sido desechadas al mar, causando la contaminación de Playa Hermosa provocando su cierre temporal desde mediados del mes de julio de 2021 (Gobierno de Ensenada, 2021 b). Este problema ambiental antecede a que la PTAR El Gallo tiene parte de su infraestructura fuera de operación desde hace más de 3 años, ocasionando que también la PTAR El Naranjo opere al máximo de su capacidad de diseño (Vargas, 2020).

## **Metodología**

El estudio se llevó a cabo en el domo Geodésico demostrativo (latitud 31°51'48.35"N, longitud 116°40'4.83"O) de la Facultad de Ciencias Marinas (FCM) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), en la ciudad de Ensenada, México por 40 días de junio a agosto 2023. Se construyeron 12 sistemas idénticos (Fig. 1), cada uno de ellos se conformó por un Sistema de Recirculación Acuícola (Recirculating Aquaculture System, RAS), compuesto de un filtro sedimentador, un biofiltro con un kg de medio Kaldness, y un tanque de peces; así como de un sistema hidropónico de aguas profundas, usando como sustrato hydroton. En cada sistema hidropónico las plantas estaban en suspensión con ayuda de láminas de poliestireno, que mantenían las raíces en contacto con el agua (Somerville et al., 2022). Cada sistema de acuaponía se mantenía con un volumen aproximado de 155 litros.

Se establecieron dos fuentes de agua: FW y DW, y a partir de estas se establecieron los tratamientos diferentes con sus triplicados. Dado que cada tratamiento se realizó por triplicado, el

número total de plantas a utilizar en el experimento fue de 60 plántulas (20 por sistema) de Girasol (*Helianthus annuus*) y de 108 peces (36 peces por sistema) carpa Koi (*Cyprinus carpio koi*).

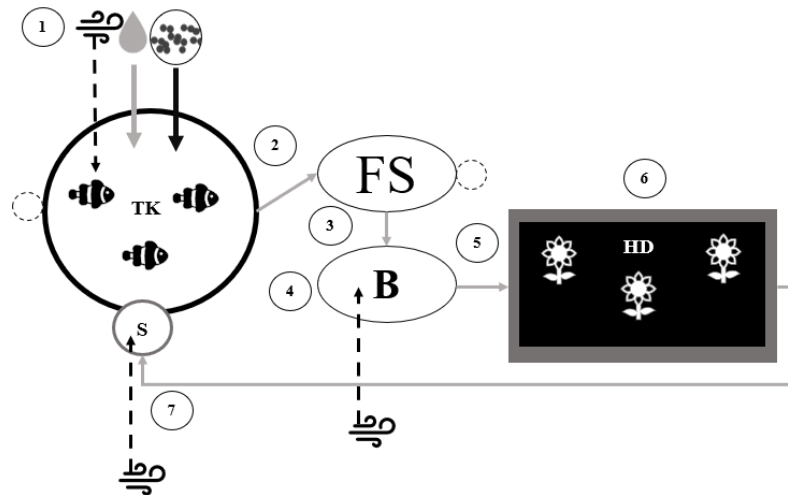


Figura 1. Presentación esquemática del sistema acuapónico experimental (no dibujado a escala). TK: indica el tanque de peces y el HD: es la unidad hidropónica. El FS, es el filtro sedimentador que se direccionaba al B, que es el biofiltro. Los pequeños círculos con líneas punteadas son salidas que tenía el TK y el FS, y que no tenían conexión con el resto del sistema. Las líneas grises indican el movimiento del agua a través de las diferentes unidades del sistema. Se le suministró aire de manera directa al TK, al B y al sifón (S), donde este último permitía realizar la recirculación para todo el sistema.

### ***Análisis de la calidad del agua de ingreso y de los tratamientos***

Se procedió a caracterizar las dos fuentes de agua, FW y DW. El agua utilizada como DW fue obtenida de una planta de tratamiento ubicada en las afueras de la Ciudad de Ensenada, Baja California, México. Por otro lado, el agua utilizada como FW provino de una toma de agua potable dentro del domo donde se realizó el experimento. Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica *in situ* de FW y DW, así como de los tratamientos, utilizando sondas multiparamétricas portátiles para medir pH, la Conductividad Eléctrica (CE), la temperatura, los Sólidos Disueltos Totales (SDT), la salinidad y el Oxígeno Disuelto (OD). Además, se tomaron muestras para realizar el análisis por triplicado de fósforo, sulfatos, azufre, nitrógeno del nitrato (N- NO<sub>3</sub>) y nitrógeno amoniacal total (Total Ammonia Nitrogen, TAN). Los parámetros de calidad del agua fueron analizados a lo largo del período experimental siguiendo los métodos estándar descritos en APHA (2005) y las Normas Mexicanas. La concentración de azufre, nitratos (NO<sub>3</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) se calculó a partir de lo obtenido de sulfatos, N-NO<sub>3</sub> y TAN, respectivamente.

El proceso de muestreo se llevó a cabo en dos etapas. La primera, denominada etapa de maduración o preexperimental, consistió en realizar cuatro muestras de FW y DW antes de la introducción de las plantas. Durante esta fase, se analizaron los parámetros previamente

mencionados, lo que permitió establecer la solución nutritiva (ver material suplementario). La segunda etapa correspondió a la fase experimental, en la cual se incorporaron las plantas al sistema y se analizaron cuatro muestras (durante los 40 días del experimento).

### ***Tratamientos experimentales***

Se establecieron cuatro tratamientos experimentales, dos para cada fuente de agua, con la diferencia de la adición de nutrientes, cuyo diseño experimental fue de  $2 \times 2$ . Como nutrientes control y para las respectivas adiciones de nutrientes disponibles (ver material suplementario) se utilizó el sulfato de calcio, fosfato de potasio monobásico, fosfato de potasio monobásico, ácido bórico, nitrato de potasio, nitrato de magnesio y micronutrientes multiusos (Maxiplex, grado agrícola marca Grow More, Estados Unidos).

El diseño experimental fue el de un ANOVA de dos vías con los siguientes tratamientos: para el tratamiento T1 – FW, se utilizó FW sin la adición de nutrientes; para el T2 – FN, se usó FW con la adición de nutrientes; para el T3 – DW, se utilizó DW sin la incorporación de nutrientes adicionales a los que ya se encuentran naturalmente en esta fuente de agua; y para el tratamiento T4 – DN, se utilizó DW con la adición de nutrientes. La concentración final de los nutrientes para el T2 – FN y el T4 – DN se basó en la solución nutritiva propuesta por Steiner (1984). Para el cálculo de la adición de nutrientes se utilizó el software de cálculo y formulación de soluciones para Hidroponía de libre distribución “Hydrobuddy”, en el cual se ingresaron los valores de la calidad del agua (N-NO<sub>3</sub>, fósforo y azufre) y la composición de los nutrientes añadidos.

### ***Eficiencia de eliminación de TAN y NH<sub>3</sub>: DW***

La eficiencia de eliminación (RE%) de TAN y NH<sub>3</sub> de las DW se calculó usando la siguiente ecuación (Rana et al., 2011):

$$\text{Eficiencia de eliminación (\%)} = \left( \frac{I_{ART} - F_{ART}}{I_{ART}} \right) \times 100$$

Para los fines de este estudio, la concentración inicial ( $I_{ART}$ ) se consideró la concentración promedio obtenida del TAN y NH<sub>3</sub> en el periodo de experimentación (para el T3– DW y T4– DN). En el caso de la concentración final ( $F_{ART}$ ) se consideró como el promedio de la concentración de TAN y NH<sub>3</sub> en cada tratamiento durante todo el periodo experimental.

### ***Desempeño del crecimiento y desarrollo de los peces***

En cada tanque (TK) se ingresaron 36 peces, resultando una biomasa inicial de  $124.33 \pm 0.49$  g. La capacidad del tanque era de 100 litros, pero se llenó hasta los 82 litros. Los peces fueron alimentados manualmente, tres veces al día (09:00 h, 13:00 h y 17:00 h), con un alimento granulado comercial con 43% de proteína cruda. Durante el periodo experimental, con el fin de estresar lo mínimo a los organismos, se realizaron dos muestreos de peces para obtener la biomasa total en cada sistema y se contabilizaron los organismos, esto al inicio y final del experimento. Asimismo, se calculó la supervivencia con la siguiente fórmula (Javanmardi et al., 2022):

$$\text{Supervivencia\%} = \frac{\text{número de peces al final}}{\text{número de peces al inicio}} \times 100$$

El rendimiento de los peces se evaluó utilizando índices de crecimiento como crecimiento absoluto (WG), Tasa de crecimiento diario (daily growth rate, DGR), ganancia en peso (weight gain WG %), y Tasa de crecimiento específico (specific growth rate, SGR). El cálculo de los índices se basó en las siguientes fórmulas (Mohammadi et al., 2020; Muhammadar et al., 2021):

$$\begin{aligned}WG &= W_2 - W_1 \\DGR &= \frac{[W_2 - W_1]}{\text{time (days)}} \\WG \% &= \frac{[W_2 - W_1]}{W_1} \times 100 \\SGR \% &= \frac{\ln(W_2) - \ln(W_1)}{\text{time (days)}} \times 100\end{aligned}$$

Donde  $W_1$  es el promedio del peso inicial de cada pez,  $W_2$  es el promedio peso final de cada pez.

### ***Análisis de los atributos morfológicos y fisiológicos de las plantas***

Las plantas utilizadas en este trabajo se obtuvieron del Centro Floricultor de Baja California, ubicado en el Valle de Maneadero al sur de la ciudad de Ensenada. Se obtuvieron girasoles (*Helianthus annuus*) al inicio de su germinación (Fig. 2a) en dos bandejas para plántulas, donde su etapa de emergencia se terminó en 4 días (Fig. 2b), y 19 días después llegaron al tamaño de plántulas presentando 4 hojas verdaderas (etapa vegetativa) (Fig. 2c). Durante este periodo se regaron con agua dulce de manera diaria, alrededor de tres semanas. Al iniciar la etapa vegetativa se ingresaron a los sistemas de acuaponía.

Considerando las condiciones de cultivo de los productores comerciales que manejan una densidad de 30 plantas por  $1 \text{ m}^2$  y que cada unidad hidropónica tenía un área superficial de  $0.7 \text{ m}^2$ ,

con un área disponible de 0.66 m<sup>2</sup>, por cada sistema acuapónico se plantaron 20 plántulas de girasol, para un total de 60 plántulas por tratamiento. Para los muestreos de plantas se consideró un tamaño mínimo de muestra de 33 por tratamiento, esto para obtener un nivel de confianza de 90%. Al inicio del experimento y al finalizar la etapa reproductiva (Fig. 2f) se midió la longitud y diámetro del girasol utilizando una cinta métrica y un calibrador vernier.

Al finalizar el experimento se midió el peso fresco y seco con una balanza analítica marca Ohaus Modelo Pioner, para ello se dividió la planta por partes (flor, tallo y raíz) (Poorter et al., 2012). El peso fresco se obtuvo pesando cada parte del girasol recién cosechado. Para la obtención del peso seco, se secaron las partes de las plantas por separado en un horno de convección a 65°C por 5 días, hasta peso constante.

Con respecto a los parámetros biométricos, como el peso fresco y seco de las partes de las plantas, se utilizaron índices que permitían evaluar las medidas fenotípicas de los girasoles, donde las diferencias entre los valores se pueden asociar al estrés dado por los diferentes tratamientos (Poorter et al., 2012; Barnhart et al., 2022). Para ello al final del experimento, se calculó la Fracción de masa de la raíz (RMF), a través de la siguiente ecuación:

$$RMF = \frac{\text{Masa seca de la raíz (g)}}{\text{masa seca total de la planta (g)}}$$

El índice que se midió con relación a la respuesta fisiológica de las plantas en respuesta a la exposición de cada tratamiento experimental fue el Índice de Contenido de Clorofila (ICC) con el medidor no destructivo CCM-200+ Chlorophyll Content Meter (Opti Sciences, Hudson NH, USA).



a) Inicio de germinación



b) Fin de la etapa de emergencia



c) Etapa vegetativa



d) Etapa reproductiva (R-1)



e) Etapa reproductiva (R-2)



f) Etapa reproductiva (R-3)

Figura 2. Estadios fenológicos de los girasoles.

### ***Análisis estadístico***

Se calculó para todos los datos la media y la desviación estándar. A los datos tabulados de calidad del agua de ingreso (DW y FW), primero se verificaron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (prueba de Levene), luego se aplicó un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) y se utilizó la prueba de Tukey HSD para evaluar si había diferencias entre las etapas de muestreo (la preexperimental y la experimental).

Para los resultados tabulados de calidad del agua y concentración de nutrientes de los diferentes tratamientos en los sistemas de acuaponía, además de comprobar los supuestos estadísticos, se realizó un ANOVA unidireccional y se aplicó la prueba de Tukey HSD (Diem et al., 2017). Adicionalmente, se revisaron las interacciones entre el tipo de agua y los nutrientes mediante un ANOVA de dos vías para determinar el efecto de diferentes tratamientos sobre los cambios en las concentraciones de nutrientes a lo largo del periodo experimental (40 días) (Diem et al., 2017; Kaburagi et al., 2020; Szymańska et al., 2022). Para los resultados de los sistemas, se aplicó la corrección de pruebas múltiples de Bonferroni, para comparaciones posteriores por pares si el ANOVA era significativo (Kaburagi et al., 2020).

Para la evaluación del desempeño del crecimiento y desarrollo de los peces, así como para el análisis de las diferencias de los atributos morfológicos y fisiológicos de las plantas se procedió a utilizar el mismo procedimiento que para la calidad del agua y concentración de los nutrientes de los diferentes tratamientos en los sistemas de acuaponía.

Todos los análisis fueron realizados con el paquete estadístico IBM SPSS Statistics versión 26 para Windows utilizando una significancia del 95%.

## **Resultados**

### ***Calidad del agua de ingreso, etapas: preexperimental y experimental***

El análisis de la calidad del agua de entrada para los sistemas de acuaponía se realizó en dos etapas: preexperimental y experimental (Tabla 1). En las dos etapas del experimento y para ambas fuentes de agua, los resultados de temperatura, concentración de N-NO<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub> no mostraron diferencias significativas. El valor del pH y OD para FW fue más alto (Tabla 1). Las muestras de DW mostraron una mayor concentración de salinidad, SDT y CE, manteniéndose constante entre las dos etapas del experimento (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y dinámica de nutrientes en los periodos preexperimental y experimental de las diferentes fuentes de agua.

Parámetros	Unit	FW		DW		Sig.
		Preexperimental	Experimento	Preexperimental	Experimento	
pH		8.37±0.07 <sup>a</sup>	8.24±0.20 <sup>a</sup>	7.79±0.10 <sup>b</sup>	7.66±0.07 <sup>b</sup>	*
Temperatura	°C	20.63±3.54	23.76±1.87	22.35±1.74	24.49±1.08	ns
OD	mg/L	8.23±0.61 <sup>abc</sup>	8.07±0.34 <sup>abc</sup>	6.77±0.39 <sup>bc</sup>	7.21±0.57 <sup>ac</sup>	*
Salinidad	ppt	0.70±0.14 <sup>b</sup>	0.68±0.10 <sup>b</sup>	1.38±0.10 <sup>a</sup>	1.5±0.08 <sup>a</sup>	*
SDT	mg/L	707.75±100.98 <sup>b</sup>	627.75±7.27 <sup>b</sup>	1368.75±83.03 <sup>a</sup>	1360.00±125.36 <sup>a</sup>	*
CE	µS/cm	1427.50±195.38 <sup>b</sup>	1270.75±15.52 <sup>b</sup>	2677.50±205.65 <sup>a</sup>	2662.50±241.71 <sup>a</sup>	*
Fósforo	mg/L	0.09±0.02 <sup>b</sup>	0.09±0.03 <sup>b</sup>	15.50±5.16 <sup>a</sup>	11.55±0.43 <sup>a</sup>	*
Sulfatos	mg/L	361.64±14.39 <sup>c</sup>	342.35±23.63 <sup>bc</sup>	406.10±12.81 <sup>ab</sup>	390.78±26.62 <sup>abc</sup>	*
Azufre	mg/L	120.72±4.80 <sup>bc</sup>	114.24±7.89 <sup>c</sup>	135.56±4.28 <sup>ab</sup>	130.44±8.89 <sup>abc</sup>	*
N- NO <sub>3</sub>	mg/L	0.03±0.02	0.03±0.02	0.04±0.03	0.04±0.01	ns
NO <sub>3</sub>	mg/L	0.12±0.10	0.14±0.10	0.16±0.15	0.18±0.07	ns
TAN	mg/L	0.00 <sup>b</sup>	0.00 <sup>b</sup>	70.46±6.54 <sup>a</sup>	66.89±5.71 <sup>a</sup>	*
NH <sub>3</sub>	mg/L	0.00 <sup>b</sup>	0.00 <sup>b</sup>	2.23±0.43 <sup>a</sup>	1.82±0.41 <sup>a</sup>	*

Los valores con el mismo superíndice no mostraron diferencias significativas ( $P \geq 0.05$ ). Los valores son medias  $\pm$  SD de tres sistemas acuapónicos ( $n = 3$ ). Las diferencias estadísticamente significativas entre las fuentes de agua, FW y DW, se muestran con un asterisco \*, y ns = no significativo.

La concentración de los nutrientes como fósforo total, sulfatos y azufre fue mayor en las muestras de DW, manteniéndose constante sin diferencias entre las etapas preexperimental y experimental (Tabla 1). En contraste, la concentración de TAN y NH<sub>3</sub> fue notablemente diferente entre DW y FW. En FW, no se detectó la presencia de estos contaminantes, mientras que en el DW la concentración fue mayor y se mantuvo constante durante ambos periodos, preexperimental y experimental (Tabla 1).

### Calidad del agua de los tratamientos experimentales

Durante los 40 días del experimento, se llevó a cabo el análisis de la calidad de los tratamientos experimentales. Los parámetros medidos *in situ*, como el pH, temperatura, y el OD no mostraron diferencias significativas entre ningún tratamiento (Tabla 2). La concentración de SDT, Salinidad y CE fue más alta en T4 – DN, seguido de T2 – FN > T3 – DW > T1 – FW (Tabla 2). Sin embargo, al evaluar la interacción entre las fuentes de agua y los nutrientes, no se observaron efectos significativos, pero sí se ve un incremento en SDT, salinidad y CE, tanto por la fuente DW, como en la adición de nutrientes.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos y dinámica de nutrientes durante el periodo experimental de 40 días en los diferentes tratamientos experimentales.

Parámetros	Unidades	FW	DW	Valor-p
------------	----------	----	----	---------

		T1 – FW	T2 – FN	T3 – DW	T4 – DN	
<b>pH</b>		8.44±0.10	8.43±0.16	8.50±0.17	8.34±0.11	ns
<b>Temperatura</b>	°C	21.59±0.58	21.76±0.65	21.59±0.35	21.32±0.34	ns
<b>OD</b>	mg/L	10.01±0.38	11.37±0.67	11.29±1.36	10.92±0.76	ns
<b>Salinidad</b>	ppt	0.89±0.03 <sup>d</sup>	1.95±0.08 <sup>b</sup>	1.73±0.03 <sup>c</sup>	2.92±0.05 <sup>a</sup>	*
<b>SDT</b>	mg/L	895.07±26.80 <sup>d</sup>	1921.80±90.41 <sup>b</sup>	1707.07±30.38 <sup>c</sup>	2862.67±40.61 <sup>a</sup>	*
<b>CE</b>	µS/cm	1773.33±72.23 <sup>d</sup>	3717.33±165.85 <sup>b</sup>	3319.33±56.76 <sup>c</sup>	5442.67±75.29 <sup>a</sup>	*
<b>Fósforo</b>	mg/L	9.82±1.29 <sup>a</sup>	7.36±0.96 <sup>ab</sup>	4.23±0.71 <sup>c</sup>	4.99±0.67 <sup>bc</sup>	*
<b>Sulfatos</b>	mg/L	395.79±18.35 <sup>b</sup>	565.46±30.50 <sup>a</sup>	373.67±20.74 <sup>b</sup>	611.67±66.56 <sup>a</sup>	*
<b>Azufre</b>	mg/L	132.12±6.13 <sup>b</sup>	188.75±10.18 <sup>a</sup>	124.73±6.93 <sup>b</sup>	204.17±22.22 <sup>a</sup>	*
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	mg/L	1.03±0.34 <sup>d</sup>	63.86±1.05 <sup>a</sup>	8.24±0.89 <sup>c</sup>	57.65±0.67 <sup>b</sup>	*
<b>NO<sub>3</sub></b>	mg/L	4.58±1.49 <sup>d</sup>	282.73±4.65 <sup>a</sup>	36.47±3.94 <sup>c</sup>	255.23±2.97 <sup>b</sup>	*
<b>TAN</b>	mg/L	0.66±0.18	0.83±0.24	0.35±0.10	0.69±0.12	ns
<b>NH<sub>3</sub></b>	mg/L	0.09±0.01	0.10±0.02	0.05±0.03	0.07±0.02	ns

Los valores con el mismo superíndice no mostraron diferencias significativas ( $P \geq 0.05$ ). Los valores son medias  $\pm$  SD de los tres sistemas acuapónicos por tratamiento ( $n = 3$ ). Las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos se muestran con un asterisco \*, y ns = no significativo.

En la concentración de fósforo en los diferentes tratamientos se observa que hay una interacción, donde el efecto por la adición de nutrientes depende del tipo de agua. No se observaron diferencias en la concentración de sulfatos y azufre entre los tratamientos que no se les añadió nutrientes (T1 – FW, T3 – DW), ni entre los que se complementaron con nutrientes (T2 – FN, T4 – DN), observándose que el efecto de la adición de nutrientes influye en la interacción de nutrientes y la fuente de agua (Tabla 2). La concentración de N-NO<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub> fue más alta en T2 – FN, pero en todos los tratamientos hubo diferencias significativas, efecto que se asocia a que sí hay diferencia entre los que se les suministró nutrientes y que es independiente de la fuente de agua (Tabla 2). Para la concentración de TAN y NH<sub>3</sub>, se observa que no hubo diferencias significativas entre ningún tratamiento, donde todas las muestras se mantuvieron en menos de 1 mg/L (Tabla 2).

### ***Eficiencia de eliminación de TAN y NH<sub>3</sub> de DW***

La concentración de TAN y NH<sub>3</sub> disminuyó considerando los valores de entrada (Tabla 1) hasta los niveles encontrados en el monitoreo de los sistemas (Tabla 2). En el T3 – DW, se observó una eficiencia de RE% de TAN promedio de  $99.48 \pm 0.16\%$ , mientras que para el T4 – DN fue de  $98.97 \pm 0.18\%$ . En el caso del NH<sub>3</sub> se obtuvo  $97.44 \pm 1.68\%$  para el T3 – DW, y para el T4 – DN fue de  $96.34 \pm 1.14\%$ .

### ***Crecimiento y desempeño de peces***

Al finalizar el experimento de 40 días, el tratamiento T1 – FW mostró la mayor tasa de supervivencia (90.74%), seguido por T4 – DN (87.96%) > T3 – DW (87.04%) > T2 – FN (81.48%). Se presentó un mayor incremento en el crecimiento absoluto, la tasa de crecimiento absoluta y ganancia en peso en el T2 – FN, pero con respecto a todos los tratamientos no hubo diferencias significativas (Tabla 3).

Tabla 3. Comportamiento del crecimiento de carpa Koi (*Cyprinus carpio koi*) en los diferentes tratamientos experimentales.

Parámetros	FW		DW		Valor- P
	T1 – FW	T2 – FN	T3 – DW	T4 – DN	
<b>Crecimiento absoluto (g) por pez</b>	0.75±0.46	1.34±0.84	0.79±0.50	0.52±0.51	ns
<b>Tasa de crecimiento absoluta DGR (g/día) por pez</b>	0.02±0.01	0.03±0.02	0.02±0.01	0.01±0.01	ns
<b>Ganancia en peso (%) WG% por pez</b>	21.66±13.18	38.96±24.13	22.93±14.32	15.04±14.71	ns
<b>Tasa de crecimiento específica SGR (%/day) por pez</b>	0.48±0.28	0.80±0.45	0.51±0.28	0.34±0.32	ns

Los valores son medias ± SD de los tres sistemas acuapónicos por tratamiento (n = 3). Las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos se muestran con un asterisco \*, y ns = no significativo.

### ***Crecimiento y desarrollo de las plantas***

En cada tratamiento se cultivaron 60 girasoles y se cosecharon al alcanzar su floración, proceso que ocurrió en aproximadamente 40 días. En tres de los cuatro tratamientos, los girasoles mostraron crecimiento. En el tratamiento T1 – FW, los girasoles no crecieron; no se desarrollaron hojas ni flores, y al final del experimento las plantas estaban completamente marchitas. Para los análisis estadísticos, los valores del tratamiento T1 – FW se establecieron en cero y se omitieron en la tabla de resultados (Tabla 4), donde se presentan los atributos biométricos y productivos asociados con el crecimiento y desarrollo de las plantas en respuesta a cada tratamiento experimental.

El peso de las raíces frescas no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, aunque se observó una interacción notable entre el tipo de agua y la adición de nutrientes. En cuanto al peso seco de las raíces, se encontraron diferencias significativas entre todos los tratamientos. Además, al igual que con el peso fresco, se observó un aumento significativo en el peso seco en los tratamientos enriquecidos con nutrientes, dependiendo tanto del tipo de agua como de la adición de nutrientes.

En el caso del tallo, tanto en peso fresco como seco, no se presentaron diferencias significativas entre T2 – FN y T4 – DN. El valor del peso fresco y seco de las flores en ningún

tratamiento resultó diferente. El peso fresco total y seco total en los T2 – FN y T4 – DN, no presentaron diferencias, resultando favorable considerando que en el T4 – DN se aprovecharon las DW.

Comparando el diámetro inicial ( $0.83\pm 0.03$  cm) y la longitud inicial del tallo de los girasoles ( $11.69\pm 0.36$  cm) con las medidas finales, se observó una mayor altura en los tratamientos enriquecidos con nutrientes. Sin embargo, al considerar el aumento porcentual del diámetro y la longitud en todos los tratamientos, no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de incremento respecto a sus valores iniciales (Tabla 4).

Relacionado a la respuesta fenotípica y fisiológica se midieron diferentes índices. La fracción de la masa de la raíz fue más alta en el T2 – FN sin mostrar diferencias con el T4 – DN. El ICC más alto se observó en T3 – DW, pero sin mostrar diferencias entre ningún tratamiento. Para estos últimos índices se presenta una interacción de ambos factores, el tipo de agua afecta, así como la adición de nutrientes.

**Tabla 4. Comportamiento del crecimiento y desarrollo de los girasoles (*Helianthus annuus*) en diferentes tratamientos.**

Parámetros	Unidades	T2 – FN	T3 – DW	T4 – DN	Valor-p
<b>Peso fresco</b>					
Raíz	g	47.58±9.49	28.98±18.53	50.00±3.04	ns
Tallo	g	115.24±11.45 <sup>a</sup>	44.53±28.69 <sup>b</sup>	103.91±18.55 <sup>a</sup>	*
Flor	g	54.79±13.20	31.44±20.44	55.01±9.85	ns
Total	g	217.61±34.13 <sup>a</sup>	104.96±67.53 <sup>b</sup>	208.92±30.38 <sup>ab</sup>	*
<b>Peso seco</b>					
Raíz	g	3.89±0.50 <sup>a</sup>	2.03±1.14 <sup>c</sup>	3.85±0.59 <sup>b</sup>	*
Tallo	g	17.18±2.52 <sup>a</sup>	6.33±4.22 <sup>b</sup>	14.82±2.56 <sup>a</sup>	*
Flor	g	7.41±2.02	3.91±2.30	7.39±1.34	ns
Total	g	28.48±5.00 <sup>a</sup>	12.27±7.67 <sup>b</sup>	26.06±4.48 <sup>a</sup>	*
<b>Tallo</b>					
Diámetro final	cm	3.61±0.50 <sup>a</sup>	2.28±0.66 <sup>b</sup>	3.12±0.34 <sup>a</sup>	*
Altura final	cm	77.79±7.01 <sup>a</sup>	54.73±14.81 <sup>b</sup>	74.88±2.82 <sup>a</sup>	*
Aumento en el diámetro del tallo	%	76.72±3.59	61.26±11.08	73.50±2.52	ns
Aumento en la longitud del tallo	%	84.90±1.24	77.16±6.28	84.77±0.81	ns
<b>Fracción de la masa de la raíz (RMF)</b>	g g <sup>-1</sup>	7.29±0.51 <sup>a</sup>	5.89±0.53 <sup>b</sup>	6.76±0.23 <sup>ab</sup>	*
<b>Índice de Concentración de Clorofila (ICC)</b>	ICC	12.26±2.71	13.19±2.81	12.57±2.74	ns

Los valores con el mismo superíndice no mostraron diferencias significativas ( $P \geq 0.05$ ). Los valores son medias  $\pm$  SD de los tres sistemas acuapónicos por tratamiento ( $n = 3$ ). Las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos se muestran con un asterisco \*, y ns = no significativo.

## **Discusión**

A nivel mundial, las aguas residuales con frecuencia se desperdician; alrededor del 80% de las aguas residuales se vierten al medio ambiente sin un tratamiento o uso adecuado (UNESCO, 2017). El aprovechamiento de este recurso es vital para ejercer menos presión a los recursos de agua dulce. El ART se considera una fuente viable para satisfacer la demanda de agua dulce, lo cual tiene implicaciones ambientales y económicas significativas al evitar la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua, que pueden resultar muy costosas (Jaramillo y Restrepo, 2017; Akpan et al., 2020). La agricultura ha sido la actividad más atractiva para el aprovechamiento de las ART, no sólo preservando el agua de mayor calidad para consumo humano, sino que gracias a su composición disminuye la compra y uso de fertilizantes, ya que de estas se pueden obtener nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (Licata et al., 2022; Rusănescu et al., 2022).

## ***Calidad del agua***

El monitoreo de la calidad del agua en un sistema de acuaponía tiene como objetivo evaluar la condición del medio de cultivo, asegurando el desarrollo y crecimiento de vegetales y animales acuáticos, así como de permitir que las bacterias nitrificantes prosperen, por lo que se espera que las variaciones de parámetros fisicoquímicos del agua estén en un rango óptimo para los tres tipos de organismos (Estim et al., 2019; Yanes et al., 2020).

El pH para los sistemas de acuaponía se recomienda entre 6.0 – 7.0, para que haya una simbiosis entre los tres grupos de organismos, sin embargo, de manera particular, para que las bacterias nitrificantes realicen la nitrificación se requiere un pH de 6.0 – 8.5, en el caso de los organismos acuáticos de 6.0 – 9.0, y para las plantas el rango óptimo para la disponibilidad de nutrientes se propone de 4.5 – 7.5 (Thorarinsdottir, 2015; Yanes et al., 2020; Somerville et al., 2022). El agua de consumo humano debe tener un pH entre 6.5 – 8.5 (WHO, 2024), valor que coincide con el que se obtuvo en FW (Tabla 2), sin embargo, este valor no es ideal para la absorción de nutrientes para las plantas (Somerville et al., 2022). Durante el experimento, los tratamientos mantuvieron un pH arriba de 8, lo que en teoría permitió a las bacterias nitrificantes metabolizar los desechos de los peces y el TAN y lo convirtieran en  $\text{NO}_3$ , una forma de nitrógeno disponibles para las plantas (Thorarinsdottir, 2015; Somerville et al., 2022). Nuwansi et al. (2019) emplearon aguas residuales de acuicultura fitorremediadas, mezcladas con agua dulce, logrando beneficios en la producción tanto de plantas como de peces. El pH en su estudio fluctuó entre 8.14 – 8.9, valores similares a los obtenidos en esta investigación. La temperatura promedio en los sistemas se mantuvo estable, sin

diferencias entre ningún tratamiento, y dentro del rango óptimo para los sistemas de acuaponía (17 – 30 °C), el cual resulta favorable para la nitrificación y para el crecimiento de las carpas Koi, así como para minimizar la presencia de enfermedades en los peces (Yanes et al. 2020; Nuwansi et al., 2021). La FAO (2010) recomienda que, en todas las etapas de crecimiento de los girasoles, la temperatura esté entre 20 – 25 °C, intervalo en el que se encontraron los tratamientos durante el crecimiento de los girasoles.

El OD es crucial para la supervivencia de los animales acuáticos, las plantas y las bacterias presentes en los sistemas acuapónicos. El OD debe mantener por encima de 3 mg/L, principalmente para apoyar las actividades de las bacterias nitrificantes, las cuales se vuelven ineficientes a concentraciones por debajo de 2 mg/L (Masser et al., 1999; Yanes et al., 2020; Somerville et al., 2022). Durante el monitoreo de los sistemas, se registraron niveles promedio de OD superiores a 3 mg/L en ambas fuentes de agua.

Por otro lado, la salinidad, los STD y la CE son parámetros altamente relacionados. La salinidad se define como la cantidad de concentración de las sales disueltas en el agua, que puede afectar a la fisiología de los peces modificando la ingesta de alimentos y su crecimiento (Yanes et al., 2020; Vlahos et al., 2023). En el caso de los SDT se componen de sales inorgánicas como calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, así como de pequeñas cantidades de materia orgánica disueltas en agua, mientras que la CE se relaciona con la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, es decir la cantidad de iones disueltos en el agua (WHO, 2017; Yanes et al., 2020; Velazquez-Gonzalez et al., 2022). En los sistemas de acuaponía, se recomienda mantener la salinidad en un intervalo de 0 a 2 ppt (Yanes et al., 2020), y las fuentes de agua utilizadas en este estudio se mantuvieron dentro de este rango. Ya en los tratamientos, solo el tratamiento T4 – DN fue el único que en promedio superó este intervalo, a lo que se le puede atribuir a la adición de nutrientes, así como a lo esperado de las DW de la zona, que presentan una mayor salinidad a comparación del agua dulce, como se observó en Mendoza-Espinosa et al. (2008).

Tanto la salinidad, los SDT y la CE, muestran diferencias entre todos los tratamientos, encontrándose las concentraciones más altas para cada uno de estos parámetros en el tratamiento T4 – DN, seguido de T2 – FN > T3 – DW > T1 – FW. Las plantas absorben solo lo necesario de los SDT, por lo que no se recomienda un exceso de estos compuestos. Haddad & Mizyed (2011) reportan que una vez que las plantas absorben los nutrientes necesarios, estas dejan que las sales aumenten, reportando un aumento de 1 a 7%. En este estudio, se observó un aumento máximo de 67.34 y 67.69 % en los tratamientos con FW y DW, respectivamente.

Asimismo, considerando tanto para consumo humano como para los sistemas de acuaponía se recomienda una concentración de 1000 mg/L de SDT (WHO, 2017; Yanes et al., 2020), siendo el T1 – FW, el único tratamiento que en promedio no sobrepasaba este valor, lo cual era de esperarse considerando que no tuvo adición de nutrientes y donde se observó que las plantas no se desarrollaron. La CE también se utiliza como indicador del consumo de nutrientes, permitiendo así ajustar el uso de fertilizantes para evitar el estrés salino en las plantas (Yanes et al., 2020; Velazquez-Gonzalez et al., 2022). Además, los peces requieren una concentración adecuada de sales para mantener su equilibrio osmótico (Yanes et al., 2020). Para los sistemas de acuaponía se recomienda una CE de 100 – 2000 y 30 – 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para plantas y peces, respectivamente (Yanes et al., 2020; Somerville et al., 2022). De manera similar, Nuwansi et al. (2019) compararon el agua de pozo con aguas residuales de acuicultura tratadas, donde estas últimas eran las únicas que estaban dentro de los rangos favorables para CE ( $1719.70 \pm 15.39 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Adicionalmente, evaluaron diferentes tratamientos con concentraciones del 50 al 100% de este afluente, siendo el más efectivo el mezclar con agua dulce en una proporción de 1:1, considerando los parámetros con respecto a los peces, plantas y los parámetros de calidad del agua.

Para el caso de los nutrientes como el fósforo, sulfatos, azufre, TAN y  $\text{NH}_3$ , estos se presentaron en mayores concentraciones en DW, tanto en la etapa preexperimental como experimental, lo cual era de esperarse debido a que se trata de ART (Tabla 1 y 2).

La concentración de fósforo en los distintos tratamientos mostró variaciones significativas, siendo el T1–FW el que presentó los niveles más altos, seguido por T2 – FN > T4 – DN > T3 – DW (Tabla 3). Entre los tratamientos T2–FN y T4–DN, los cuales recibieron nutrientes adicionales, no se observaron diferencias significativas en las concentraciones de fósforo. La acumulación en el T1–FW, en ausencia de plantas, sugiere que el fósforo, en ausencia de absorción vegetal, tiende a acumularse en el sistema. Este fósforo suele derivarse de los desechos disueltos producidos por el metabolismo de los peces o de restos de alimentos descompuestos que no fueron consumidos, donde hasta un 80% del fósforo ingerido se libera como residuo en el agua (Roosta, 2014; Goddek et al., 2015; Hussain et al., 2015; Dauda et al., 2019). Como se ha observado en otros estudios, tanto el fósforo como los compuestos nitrogenados pueden ser potencialmente contaminantes; sin embargo, su aprovechamiento mediante plantas en sistemas acuapónicos representa una opción ambientalmente segura para reducir su impacto (Dauda et al., 2019; Yang & Kim, 2020).

La concentración de fósforo en estos sistemas superó los 4 mg/L, lo cual es óptimo para el desarrollo de las plantas en acuaponía, pues el fósforo es esencial en las etapas vegetativas, de

floración y en el crecimiento de raíces (Cerozi y Fitzsimmons, 2016; Goddek et al., 2015; Atique et al., 2022). Con respecto al afluente, los tratamientos con DW presentaban una mayor concentración de fósforo total, lo que es común en ART (Tabla 2). La NOM-001- SEDATU, -2021 considera que las ART con concentración de fósforo de 5-21 mg/L pueden ser descargadas en aguas y bienes nacionales, o pueden ser vertidas al suelo (uso en riego agrícola), donde el ART evaluada en este estudio se podría considerar para este tipo de reutilización. Adicionalmente, considerando que la principal demanda futura de fósforo será por parte de la agricultura, una de las fuentes potenciales de suministro de fósforo es el uso de aguas residuales municipales (Campos-Pulido et al., 2013; Egle et al., 2016), tal como se muestra en el presente estudio, donde las concentraciones van desde 9.36 a 21.97 mg/L en las muestras provenientes de las DW (Tabla 2). Esto resalta el potencial de las ART como fuente de fósforo en la agricultura sostenible, contribuyendo tanto a la eficiencia de recursos como a la mitigación de contaminantes.

La concentración de sulfatos y azufre fue mayor en DW. La presencia de sulfatos es común y no tóxica tanto en aguas naturales como en residuales, y en el caso del azufre es uno de los elementos más abundantes en el entorno natural (Dou et al., 2017; Lin et al., 2018). En este estudio, la concentración de sulfatos y azufre fue mayor en T1 – FW y T3 – DW. El azufre es uno de los macronutrientes que se requieren en grandes cantidades para las plantas, el cual se absorbe en forma de sulfatos (Atique et al., 2022; Somerville et al., 2022). Las plantas necesitan el azufre para su crecimiento, desarrollo y la mitigación del estrés (Kopriva et al., 2016; Narayan et al., 2022). El valor del pH en todos los tratamientos se encontraba estimulante para la absorción de azufre en las plantas y se mantuvo dentro del intervalo recomendado para cultivos hidropónicos (48 – 336 mg/L) (Atique et al., 2022; Somerville et al., 2022).

No se observaron diferencias significativas entre tratamientos para la concentración de N-NO<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>, FW y DW (Tabla 2), ni por arriba de lo recomendado para uso y consumo humano según la NOM (10 mg/L de NO<sub>3</sub>; NOM-127-SSA1-1994), y según la OMS (50 mg/L; WHO, 2024) para evitar un efecto en la salud humana. En promedio, todos los tratamientos presentaban concentraciones diferentes, la más alta en el T2 – FN, seguido de T4 – DN > T3 – DW > T1 – FW. Los nitratos son resultado de la nitrificación, la forma de nitrógeno menos tóxica y más accesible para las plantas (Yanes et al., 2020; Nuwansi et al., 2021; Somerville et al., 2022). Para las bacterias nitrificantes, el NO<sub>3</sub> debe permanecer por debajo de <400 mg/L, en el caso de los peces pueden tolerar una concentración de 300 mg/L, incluso 400 mg/L (Somerville et al., 2022). No obstante, Yanes et al. (2020) recomiendan una concentración de 50 – 100 mg/L, ya que una concentración

mayor puede ser tóxica para los peces. En general, se recomienda que en un sistema de acuaponía la concentración de  $\text{NO}_3$  sea de 5 – 150 mg/L, lo cual coincide sólo con lo encontrado en los tratamientos T1 – FW y T3 – DW.

En este estudio, el  $\text{NO}_3$  provino de tres fuentes diferentes: (1) de los residuos de la alimentación de los peces y sus excretas, (2) la adición de nutrientes para los tratamientos T2 – FN y T4 – DN, y (3) de las fuentes de agua para los tratamientos T3 – DW y T4 – DN. Las fuentes 1 y 3, contenían compuestos nitrogenados como el TAN, donde gracias a las bacterias oxidantes de TAN, este se convertía a nitritos, el cual se convertía en  $\text{NO}_3$  gracias a las bacterias oxidantes de nitritos (Yanes et al., 2020; Somerville et al., 2022). El TAN no se presentó en la fuente de agua FW, lo cual es esperado para este tipo de agua, mientras que la fuente de agua DW presentó altas concentraciones de TAN; sin embargo, una vez que esta fuente de agua fue incorporada a los sistemas, en estos se presentó una alta eficiencia de remoción de TAN (Tabla 2), la cual, durante la etapa experimental, fue de  $99.48 \pm 0.16$  y  $98.97 \pm 0.18$  para los tratamientos T3 – DW y T4 – DN, respectivamente.

Los resultados obtenidos en este estudio superan lo obtenido del cultivo de Pez gato africano (*Clarias gariepinus*) con dos variantes de plantas, la espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y verde mostaza (*Brassica juncea*). Las tasas de remoción de TAN fueron más altas con la espinaca de agua (78.32 – 85.84 %), sin embargo, ambas plantas presentaron la habilidad de reducir la contaminación de aguas residuales de acuacultura en conjunto con las bacterias nitrificantes, como se observó en el presente estudio (Endut et al., 2011). Por otra parte, Lam et al. (2015) cultivaron gobio de mármol (*Oxyeleotris marmorata Bleeker*) con espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*), evaluando seis proporciones de componentes entre el volumen del tanque hidropónico y el volumen del tanque de cría, donde la remoción de TAN fue de 62 hasta 85%. En cultivos acuícolas se ha reportado que el TAN se desperdicia, y en los sistemas RAS este compuesto se puede convertir en  $\text{NO}_3$  que suele acumularse en el agua, a diferencia de un sistema de acuaponía donde se puede aprovechar como nutriente para las plantas (De Schryver & Verstraete, 2009; Yanes et al., 2020; Milliken et al., 2022).

Por lo regular, en un sistema de acuaponía se cultivan más especies comestibles que ornamentales (Goddek et al., 2015; Dastvan et al., 2022). Donde las más comunes son las de hoja verde, como la lechuga o la espinaca de agua, dado a su bajo requerimiento de nutrientes comparado con las hortalizas de fruto. En este estudio, la planta que se utilizó fue el girasol, el cual mostró un buen crecimiento en los tratamientos con fuente de agua DW en un sistema de acuaponía, aprovechando los nutrientes proporcionados por TAN convertidos a  $\text{NO}_3$  (Palm et al., 2018; Wu et al., 2019; Dastvan et al., 2022; Somerville et al., 2022).

Por otra parte, a nivel mundial, el NH<sub>3</sub> es la sustancia química más producida, cuyas emisiones en su mayoría son por actividades agrícolas, la cual seguirá aumentando debido a la demanda de la producción de alimentos por el crecimiento mundial poblacional (Behenera et al., 2013; Deng et al., 2021). El NH<sub>3</sub> en los cultivos acuícolas es común, ya que es el producto principal que se excreta, esto por la ingesta rica en proteínas, donde el exceso de aminoácidos se convierte en NH<sub>3</sub> (Schram et al., 2010; Sichula et al., 2011). El NH<sub>3</sub> por encima de 1 mg/L es una de las formas de nitrógeno más tóxica para los peces, por ello una de las medidas por las que se opta para eliminar o reducir altas concentraciones de este metabolito en sistemas tradicionales de cultivos acuícolas es el recambio de agua, mientras que en acuaponía el agua se recircula, teniendo altas tasas de eficiencia de reúso de agua (95 – 99 %) (Milliken et al., 2022; Somerville et al., 2022).

Asimismo, en este estudio la concentración de NH<sub>3</sub> durante la etapa experimental tuvo un porcentaje de remoción de NH<sub>3</sub> de 97.35±1.69 y 96.27±1.23 % en los tratamientos T3 – DW y T4 – DN, respectivamente (Tabla 2). Gichana et al. (2019) cultivaron a la Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), en combinación con diferentes plantas: calabaza (*Cucurbita pepo*), ajeno dulce (*Artemisia annua*) y amaranto (*Amaranthus dubius*), encontrando tasas de remoción de NH<sub>3</sub> que iban desde 48.8±4.6 a 50±3.13 % en promedio. Así mismo, Su et al. (2020) evaluaron diferentes volúmenes (50 g, 300 g y 450 g) de medio biocarbón de pirólisis (pyrolysis biochar), encontrando una eficiencia de remoción de NH<sub>3</sub> de 27.78%, 43.65% y 66.66 %, respectivamente. En ambos estudios se presentó una tasa de remoción de NH<sub>3</sub> más baja que en el presente estudio, lo que convierte a los sistemas acuapónicos en una opción ambientalmente importante para su eliminación.

### ***Rendimiento de la producción de pescado***

La biomasa de peces seleccionada para este estudio se consideró conservadora, estableciéndose en 0.015± 0.005 Kg/m<sup>3</sup>. Según Somerville et al. (2022), para un tanque con un volumen de 82 litros, la biomasa recomendada es de 0.82 Kg/m<sup>3</sup>. Esta elección cautelosa se basa en reducir el estrés en los peces y mitigar la acumulación excesiva de nutrientes en el sistema, facilitando así un control más preciso de las condiciones del agua.

En términos de condición y producción, índices vinculados al peso como la WG, DGR, WG % o el SGR % son herramientas valiosas para considerar el estado de un ecosistema acuático y su posible contaminación (Endut et al., 2011; Teubner et al., 2015). Al final del experimento, no se encontraron diferencias significativas en los índices medidos (Tabla 3). Pero, numéricamente, el mayor aumento de peso fue en T2 – FN, seguido de T3 – DW > T1 – FW > T4 – DN. En cuanto al

crecimiento absoluto, no hubo diferencias entre los tratamientos, pero se destacó una tendencia en el T2 – FN, que utilizó agua con micronutrientes, contrario al T4 – DN, donde se observó que el uso de ART sin adición de nutrientes fue más efectivo, como también demostró el índice DGR.

En un estudio reciente, Villarroel et al. (2022) encontraron un mayor incremento en WG para las tilapias cultivadas cuando se añadieron nutrientes para lechugas. Por otro lado, Zou et al. (2016) evaluaron tres tratamientos con diferentes valores de pH (6.0, 7.5, 9.0) y observaron un aumento significativo en la biomasa de los peces a pH 7.5, aunque el SGR no mostró diferencias entre los tratamientos. En nuestro estudio, el SGR fue mayor en T2 – FN, aunque no hubo diferencias significativas con los otros tratamientos evaluados. En comparación con otros estudios, nuestros valores de SGR fueron similares o mayores (Zou et al., 2016: 0.22 – 0.39; Baßmann et al., 2017: 0.41 – 0.48).

En cuanto a la supervivencia fue mayor en el T1 – FW (90.74%), donde los parámetros de calidad del agua se mantuvieron dentro de los intervalos óptimos para su crecimiento y desarrollo (Thorarinsdottir, 2015; Yanes et al., 2020; Somerville et al., 2022).

### ***Dinámica de producción de plantas***

Los efectos de los tratamientos experimentales en el crecimiento, desarrollo y producción de los girasoles se evaluaron a través de monitoreo constante. La elección del cultivo de aguas profundas con sustrato es frecuentemente utilizada en cultivo de flores, tal como rosas o girasoles (Dastvan et al. 2022). La elección mencionada anteriormente se realizó con el objetivo de proporcionar a los girasoles las condiciones óptimas para su crecimiento y desarrollo en un sistema de acuaponía, considerando la exposición a diferentes tratamientos. En tres de los cuatro tratamientos, las plantas florecieron.

El peso fresco total fue ligeramente mayor en el T2 – FN, sin presentar diferencias significativas con el T4 – DN, lo mismo que se observó en el peso individual de cada parte de la planta (Tabla 4). De manera similar a los hallazgos de este estudio, Dantas et al. (2019) evaluaron el crecimiento y desarrollo de girasoles en una región semiárida de Brasil, comparando el uso de aguas residuales tratadas domésticas, agua dulce y agua pública. Los resultados mostraron altos rendimientos en términos de peso fresco y seco al utilizar aguas residuales tratadas, lo que respalda su viabilidad para mejorar la producción en áreas con disponibilidad limitada de agua. En zonas semiáridas como Baja California, donde el estrés hídrico representa una restricción para la

agricultura, alternativas como su uso debe fortalecerse consideradas para optimizar los cultivos en condiciones de escasez.

El girasol suele ser una planta alta. Los girasoles del tipo silvestres pueden crecer hasta 4-5 m, mientras que los cultivados pueden alcanzar entre 1.5 a 2 m (Kaya et al., 2012). Los girasoles que se cultivan con fines ornamentales se pueden clasificar como gigante o muy alto (2.5–5 m), semi-dwarf (1–2.5 m), y dwarf (<1 m) (Fernández-Martínez et al., 2009). En el presente estudio, para todos los tratamientos, alcanzaron la clasificación de dwarf, según la clasificación Fernández-Martínez et al. (2009) de girasoles con fines ornamentales. Otra clasificación considera que la longitud de los tallos de los girasoles de T2 – FN y T4 – DN se encuentra en un grado medium cercano al selecto, mientras que el grosor se consideraría selecto (>2.0 cm) (Carrillo & Yumbla-Orbes, 2022).

Como parte de la asignación de la biomasa de la planta y que se puede asociar como respuesta fenotípica al estrés, se presenta la Fracción de la masa de la raíz (RMF), donde el tratamiento con agua dulce, el T2 – FN fue mayor a los dos tratamientos con aguas residuales tratadas domésticas, y donde no hubo diferencias significativas entre el T3 – DW y T4 – DN. Considerando que la RMF del T2– FN fue el más alto en el estudio, se puede interpretar que hubo una baja concentración de nutrientes, por lo que requería extender sus raíces, como lo observado en el estudio de Barnhart et al. (2022), donde en el tratamiento con bajo nivel de nutrientes obtuvo  $0.60 \pm 0.01$  (g g<sup>-1</sup>). Por otro lado, del T3 – DW presentó el valor más bajo de RMF, lo cual puede asociarse a la necesidad de invertir mayor biomasa en el crecimiento aéreo y la fotosíntesis (Poorter et al., 2012; Rehling et al., 2021). De acuerdo con Barnhart et al. (2022), el RMF suele ser mayor en plantas pequeñas, efecto conocido como escalamiento alométrico, lo cual no se observó en este estudio, ya que las plantas del tratamiento T3 – DW fueron las más pequeñas y obtuvieron el RMF más alto (Tabla 4). Sin embargo, la inhibición de la elongación de las plantas, también se puede deber a la presencia de metales como el Al, Zn, Cu, Cd, Ni y Zn, que pueden encontrarse en aguas residuales, incluso si ya han sido tratadas (Ma et al., 1997; Salgado-Méndez et al., 2019; Palm et al., 2021). El Valle de Maneadero se ubica a 15 km al sur de Ensenada, donde Salgado-Méndez et al. (2019) evaluaron el uso de aguas residuales tratadas para cultivos agrícolas, encontrando la presencia de metales traza como Al, el Fe y el Zn, los cuales estaban relativamente enriquecidos. Estos autores sugieren que el exceso de Al y Zn puede provocar deficiencia de Ca y Mg en las plantas cultivadas, así como provocar una disminución del fósforo y reducir la biomasa de la planta (Salgado-Méndez et al., 2019).

La clorofila es un indicador importante de la información nutricional de las plantas, que está fuertemente influenciado por el contenido de nitrógeno de las plantas (Kalaji et al., 2016; Čepulienė et al., 2022). El ICC se considera una respuesta fenotípica y como parámetro fisiológico que se relaciona al estrés de la planta y como reflejo del proceso de fotosíntesis (Kalaji et al., 2016; Mohsin et al., 2023). En este estudio, no hubo diferencias significativas en el ICC para los tratamientos T2 – FN, T3 – DW y T4 – DN. La adición de nutrientes beneficia al contenido de clorofila, y con relación a la fuente de agua, la DW también influyó positivamente. Además, se observa la interacción entre la fuente de agua y la adición de nutrientes, tendiendo a un mayor incremento en el ICC con DW, lo cual es beneficioso en términos de aprovechamiento de este recurso y apoya su reúso. Conocer el valor de la clorofila no sólo permite aprovechar las aguas residuales tratadas domésticas, sino también ajustar la aplicación de fertilizantes nitrogenados, si es necesario (Álvarez-Holguín et al., 2022; Čepulienė et al., 2022).

## **Conclusiones**

Dado el potencial de la acuaponía para recircular y utilizar eficientemente los nutrientes y el agua, se propuso su implementación en una región semiárida, combinada con el uso de aguas residuales domésticas tratadas.

El uso de las DW para este estudio fue útil para el desarrollo y crecimiento de los girasoles, teniendo tres fuentes diferentes de nitratos: (1) de los residuos de la alimentación de los peces y sus excretas, (2) la adición de nutrientes, en el caso de los T2 – FN y T4 – DN, y (3) de las DW, para los T3 – DW y T4 – DN. Esto se reflejó en los girasoles, ya que en los tres tratamientos no hubo diferencias significativas al menos en el T2 – FN y T4 – DN, lo que representa que las DW pueden ser una opción eficiente.

Se recomienda el aprovechamiento de las DW con precaución, considerando la implementación de biofiltros efectivos. En este estudio con el cual su RE% de TAN promedio en T3 – DW ( $99.48 \pm 0.16\%$ ) y T4 – DN ( $98.97 \pm 0.18\%$ ), fue más alta que en otros experimentos. Asimismo, se recomienda mantener el control del pH, manteniéndolo en un intervalo de 6.5 – 7.0, esto se puede lograr empleando soluciones de bicarbonato, para subir el pH, y para bajarlo que en este caso se hubiera requerido sería utilizar turba, agua destilada o recambio de agua con menor pH. La opción más eficiente para bajar el pH es aumentar el CO<sub>2</sub>, a través del incremento de la biomasa de peces y, lo que, a su vez, proporciona más nutrientes para las plantas.

Aunque no se han reportado alta presencia de metales en las DW de la localidad, no se pueden descartar. Por lo tanto, se recomienda evaluar estos componentes y se sugiere el uso de girasoles para absorber iones metálicos presentes en las aguas residuales, ya que estas plantas han demostrado una capacidad significativa para ello.

El reúso de las DW es una opción eficiente para su aprovechamiento en sistemas de acuaponía, especialmente para el cultivo de plantas ornamentales. En el caso de los peces, se requeriría una evaluación más exhaustiva de parámetros para analizar los efectos hematológicos y ajustes fisiológicos relacionados con las condiciones de cultivo.

### ***Material suplementario. Solución nutritiva***

Los resultados de la calidad del agua con la adición de nutrientes para llegar a la solución Steiner para los tratamientos T2 y T4 se observan en la Tabla, donde también se reporta el error bruto que se considera como la magnitud en la que los valores calculados se desviaron con respecto a la solución Steiner (Tabla 4).

Tabla 5. Resultados de la solución nutritiva obtenidos de la aplicación de Hydrobuddy.

<b>Elemento</b>	<b>Solución nutritiva Steiner</b>	<b>Concentración final: T2 – FW</b>	<b>Concentración final: T4 – DW</b>
<b>N-NO<sub>3</sub> (mg/L)</b>	168	168.00	168.00
<b>P (mg/L)</b>	31	31.00	31
<b>K (mg/L)</b>	273	361.84	342.12
<b>Mg (mg/L)</b>	48	48.00	48
<b>Ca (mg/L)</b>	180	180.00	180
<b>S (mg/L)</b>	336	273.76	283.364
<b>Fe (mg/L)</b>	2	1.34	1.34
<b>Mn (mg/L)</b>	0.62	1.53	1.53
<b>Zn (mg/L)</b>	0.11	0.77	0.77
<b>B (mg/L)</b>	0.44	0.44	0.44
<b>Cu (mg/L)</b>	0.02	0.58	0.58

## **Bibliografía**

- Acosta-Zamorano, Dinora, Macías-Carranza, Víctor, Mendoza-Espinosa, Leopoldo, y Cabello-Pasini, Alejandro. (2013). Efecto del agua residual tratada sobre la composición química de Uva Tempranillo (*Vitis vinifera*) en Baja California, México. *Agrociencia*, 47(8), 767-779.
- Adhikari, R., Rauniyar, S., Pokhrel, N., Wagle, A., Komai, T., & Paudel, S. R. (2020). Nitrogen recovery via aquaponics in Nepal: current status, prospects, and challenges. *SN Applied Sciences*, 2, 1-15.
- Akpan, V. E., Omole, D. O., & Bassey, D. E. (2020). Assessing the public perceptions of treated wastewater reuse: opportunities and implications for urban communities in developing countries. *Heliyon*, 6(10).
- Álvarez-Holguín, A., Sosa-Perez, G., Ponce-García, O. C., Lara-Macias, C. R., Villarreal-Guerrero, F., Monzon-Burgos, C. G., & Ochoa-Rivero, J. M. (2022). The impact of treated wastewater irrigation on the metabolism of barley grown in arid and semi-arid regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2345.
- American Public Health Association (APHA) 2005. *Standard Methods of Water and Wastewater*. 21st, Washington, DC., ISBN: 0875530478, 1288
- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., and Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 26.
- Atique, F., Lindholm-Lehto, P., & Pirhonen, J. (2022). Is aquaponics beneficial in terms of fish and plant growth and water quality in comparison to separate recirculating aquaculture and hydroponic systems?. *Water*, 14(9), 1447.
- Barnhart, M. H., Masalia, R. R., Mosley, L. J., & Burke, J. M. (2022). Phenotypic and transcriptomic responses of cultivated sunflower seedlings (*Helianthus annuus* L.) to four abiotic stresses. *Plos one*, 17(9), e0275462. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275462>
- Baßmann, B., Brenner, M., & Palm, H. W. (2017). Stress and welfare of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a coupled aquaponic system. *Water*, 9(7), 504.
- Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., & Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 8092-8131.
- Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., & Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 8092-8131.

- Campos-Pulido, R., Alonso-López, A., Avalos-de la Cruz, D. A., Asiain-Hoyos, A., & Retamendiola, J. L. (2013). Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(SPE5), 939-950.
- Carrillo Criollo, J. F., & Yumbla-Orbes, M. (2022). Caracterización morfológica y análisis de crecimiento de tres cultivares de *Helianthus annuus* L. para flor de corte. *Siembra*, 9(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3323>
- Čepulienė, R., Butkevičienė, L. M., Skinulienė, L., & Steponavičienė, V. (2022). Response of cucumbers (*Cucumis sativus* L.) to waste wood fiber substrates and additional nitrogen fertilization. *Plants*, 11(24), 3464.
- Čepulienė, R., Butkevičienė, L. M., Skinulienė, L., & Steponavičienė, V. (2022). Response of cucumbers (*Cucumis sativus* L.) to waste wood fiber substrates and additional nitrogen fertilization. *Plants*, 11(24), 3464.
- Cerozi B.S., Fitzsimmons K. (2016). The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technol.* 2016;219:778-781. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.079>
- Cifuentes Torres, M. L. (2022). Reúso de agua residual tratada como fuente de nutrientes para el crecimiento de flores de interés comercial en sistemas hidropónicos.
- Cifuentes-Torres, L., Correa-Reyes, G., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2021). Can Reclaimed Water Be Used for Sustainable Food Production in Aquaponics?. *Frontiers in plant science*, 12, 669984. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669984>
- Colorado Gómez, M. A., & Ospina Correa, M. (2019). La acuaponía como herramienta de formación en tiempos de paz. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/5555>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. Disponible en: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). EL REPORTE DEL CLIMA EN MEXICO. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2020.pdf>
- Cortés-Ruiz, A., & Azuz-Adeath, I. (2021). Estimating the future hydric needs of Baja California, Mexico. Assessment of scenarios to stop being a region with water scarcity. *Water Supply*, 21(6), 2760-2771.

- Dantas, D., Silva, Ê. F., Rolim, MM, da Silva, M., Florentino de Morais, JE y Lira, RM (2019). Componentes de la producción de plantas de girasol regadas con aguas residuales domésticas tratadas y agua potable en región semiárida. *Revista Ceres*, 66 (1),34-40. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=305259036005>
- Dastvan, B., Pate, J., Dole, J., Precht, T., & Hall, P. (2022). Growing Dahlias, *Dahlia coccinea* Cav., for Commercial Cut Flower Production in Aquaponics and AutoPots. *Journal of Floriculture and Landscaping*, 8, 1-7.
- Dauda, A. B., Ajadi, A., Tola-Fabunmi, A. S., & Akinwole, A. O. (2019). Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4(3), 81-88.
- De Schryver P & Verstraete W. (2009). Nitrogen removal from aquaculture pond water by heterotrophic nitrogen assimilation in lab-scale sequencing batch reactors. *Bioresource Technology* 100: 1162–1167
- Deng, Z., van Linden, N., Guillen, E., Spanjers, H., & van Lier, J. B. (2021). Recovery and applications of ammoniacal nitrogen from nitrogen-loaded residual streams: A review. *Journal of Environmental Management*, 295, 113096.
- Diem, T. N. T., Konnerup, D., & Brix, H. (2017). Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 78, 95-104.
- Dou, W., Zhou, Z., Jiang, L. M., Jiang, A., Huang, R., Tian, X., Zhang W. & Chen, D. (2017). Sulfate removal from wastewater using ettringite precipitation: Magnesium ion inhibition and process optimization. *Journal of Environmental Management*, 196, 518-526.
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522-542.
- El-Essawy, H., Nasr, P., Sewilam, H. (2019). Aquaponics: a sustainable alternative to conventional agriculture in Egypt—a pilot scale investigation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26(16), 15872-15883. [doi.org/10.1007/s11356-019-04970-0](https://doi.org/10.1007/s11356-019-04970-0).
- Elizondo, L. S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2020). An analysis of water scarcity in a drought prone city: The case of Ensenada, Baja California, Mexico/Un análisis de la escasez de agua en una ciudad sujeta a sequías: el caso de la ciudad de Ensenada, Baja California, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 01-55.

- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N. A., Wan Nik, W. B. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalin. Water Treat.* 32, 422-430. doi: 10.5004/dwt.2011.2761.
- Endut, A.; Lananan, F.; Jusoh, A.; Nik, W.N.W.; Ali, N. (2016). Aquaponics recirculation system: A sustainable food source for the future water conserves and resources. *Malays. J. Appl. Sci.* 1(1), 1–12.
- Estim, A., Saufie, S., & Mustafa, S. (2019). Water quality remediation using aquaponics sub-systems as biological and mechanical filters in aquaculture. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100566.
- Faria, D. C., & Naval, L. P. (2022). Wastewater reuse: Perception and social acceptance. *Water and Environment Journal*, 36(3), 433-447.
- Fernández-Martínez, J.M., Pérez-Vich, B., Velasco, L. (2009). Sunflower. In: Vollmann, J., Rajcan, I. (eds) *Oil Crops. Handbook of Plant Breeding*, vol 4. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-77594-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77594-4_6). 155 – 232
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2010). Sunflower Crude and Refined Oils. <https://www.fao.org/4/al375e/al375e.pdf>
- Gichana, Z., Liti, D., Wakibia, J., Ogello, E., Drexler, S., Meulenbroek, P., Ondiba, R., Zollitsch, W., Waidbacher, H. (2019). Efficiency of pumpkin (*Cucurbita pepo*), sweet wormwood (*Artemisia annua*) and amaranth (*Amaranthus dubius*) in removing nutrients from a small-scale recirculating aquaponic system. *Aquac. Int.* 27, 1767–1786. doi.org/10.1007/s10499-019-00442-x.
- Gilabert-Alarcón, C., Salgado-Méndez, S. O., Daesslé, L. W., Mendoza-Espinosa, L. G., & Villada-Canela, M. (2018). Regulatory challenges for the use of reclaimed water in Mexico: a case study in Baja California. *Water*, 10(10), 1432.
- Gobierno de Ensenada. (15 de julio de 2021 b). *EMITE GOBIERNO DE ENSENADA CIERRE DE PLAYA HERMOSA*. Disponible en: <https://www.ensenada.gob.mx/?p=9469>. Acceso 20 de julio de 2021.
- Gobierno de Ensenada. (2021 a). *Plan blindaje Ensenada 2021*. Disponible en: [https://www.ensenada.gob.mx/wp-content/uploads/2021/03/Plan-Blindaje-2021\\_WEB.pdf](https://www.ensenada.gob.mx/wp-content/uploads/2021/03/Plan-Blindaje-2021_WEB.pdf) Acceso 20 de julio de 2021.

- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-4224. doi:10.3390/su7044199.
- Haddad, M. & Mizyed, N. (2011). Evaluation of various hydroponic techniques as decentralised wastewater treatment and reuse systems, *International Journal of Environmental Studies*, 68:4, 461-476, DOI: 10.1080/00207233.2011.582701
- Hussain, T., Verma, A. K., Tiwari, V. K., Prakash, C., Rathore, G., Shete, A. P., & Saharan, N. (2015). Effect of water flow rates on growth of *Cyprinus carpio* var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system. *Aquaculture international*, 23, 369-384.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Baja California. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/>. Acceso el 31 de marzo de 2021.
- Jaramillo, M. F., & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(10), 1734.
- Javanmardi, S., Rezaei Tavabe, K., Rafiee, G., Moradi, S., & Sivaji, D. (2022). Assessment of vitamin C different levels in aquaponic system on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and saffron (*Crocus sativus*): Growth performances, hematology, serum biochemistry, and digestive enzyme activity. *Aquaculture International*, 30(4), 2145-2163.
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., Jijakli, M. H., 2017. Strategic points in aquaponics. *Water*. 9:182, 1-9.
- Kaburagi, E., Yamada, M., Baba, T., Fujiyama, H., Murillo-Amador, B., & Yamada, S. (2020). Aquaponics using saline groundwater: Effect of adding microelements to fish wastewater on the growth of Swiss chard (*Beta vulgaris* L. spp. *cicla*). *Agricultural Water Management*, 227, 105851.
- Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Łukasik, I., Goltsev, V. & Ladle, R. J. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta physiologiae plantarum*, 38, 1-11.
- Kaya, Y., Jovic, S., & Miladinovic, D. (2012). Sunflower. *Technological Innovations in Major World Oil Crops, Volume 1: Breeding*, 85-129.
- Kopriva, S., Talukdar, D., Takahashi, H., Hell, R., Sirko, A., D'Souza, S. F., & Talukdar, T. (2016). Frontiers of sulfur metabolism in plant growth, development, and stress response. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1220.

- Kumar, D., Chaturvedi, M. K., Sharma, S. K., & Asolekar, S. R. (2015). Sewage-fed aquaculture: a sustainable approach for wastewater treatment and reuse. *Environmental monitoring and assessment*, 187(10), 1-10.
- Kumar, D., Hiremath, A. M., & Asolekar, S. R. (2014). Integrated management of wastewater through sewage fed aquaculture for resource recovery and reuse of treated effluent: a case study. *Apcbee Procedia*, 10, 74-78.
- Lam, S. S., Ma, N. L., Jusoh, A., & Ambak, M. A. (2015). Biological nutrient removal by recirculating aquaponic system: Optimization of the dimension ratio between the hydroponic & rearing tank components. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 107-115.
- Li, C., Lee, C. T., Gao, Y., Hashim, H., Zhang, X., Wu, W. M., Zhang, Z. (2018). Prospect of aquaponics for the sustainable development of food production in urban. *Chem. Eng. Trans.* 63, 475-480.
- Licata, M., Farruggia, D., Iacuzzi, N., Leto, C., Tuttolomondo, T., & Di Miceli, G. (2022). Effect of irrigation with treated wastewater on bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) production and soil characteristics and estimation of plant nutritional input. *Plos one*, 17(7), e0271481.
- Lin, S., Mackey, H. R., Hao, T., Guo, G., Van Loosdrecht, M. C., & Chen, G. (2018). Biological sulfur oxidation in wastewater treatment: a review of emerging opportunities. *Water research*, 143, 399-415.
- Ma, J. F., Zheng, S. J., Li, X. F., Takeda, K., & Matsumoto, H. (1997). A rapid hydroponic screening for aluminium tolerance in barley. *Plant and Soil*, 191, 133-137.
- Masser M. P., Rakocy J., Losordo T. M. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems. Management of recirculating systems. SRAC Publication, 452. <https://www.webpages.uidaho.edu/fish422and424/Aquaculture%20422/422LabFiles/Lab%201%20Systems/Losordo%20et%20al%201999%20Recirculating%20component%20options.pdf>.
- Medellín-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., & Ramírez-Acosta, R. J. (2007). The application of economic-engineering optimisation for water management in Ensenada, Baja California, Mexico. *Water science and technology*, 55(1-2), 339-347.
- Mendoza-Espinosa, L. G., & Daesslé, L. W. (2018). Consolidating the use of reclaimed water for irrigation and infiltration in a semi-arid agricultural valley in Mexico: Water management experiences and results. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 8(4), 679-687.

- Mendoza-Espinosa, L. G., Cabello-Pasini, A., Macias-Carranza, V., Daessle-Heuser, W., Orozco-Borbon, M. V., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2008). The effect of reclaimed wastewater on the quality and growth of grapevines. *Water Science and Technology*, 57(9), 1445-1450.
- Mendoza-Espinosa, L., Victoria Orozco-Borbón, M., & Silva-Nava, P. (2004). Quality assessment of reclaimed water for its possible use for crop irrigation and aquifer recharge in Ensenada, Baja California, Mexico. *Water Science and Technology*, 50(2), 285-291.
- Milliken, S., Ovca, A., Villarroel, M., Gartmann, F., Antenen, N., Bulc, T. G., Kotzen B. & Junge, R. (2022). Lessons Learned from Introducing Aquaponics to Higher Education Curricula. In: Vasconcelos, C., Calheiros, C.S.C. (ed) Enhancing Environmental Education Through Nature-Based Solutions. Integrated Science, vol 4. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-91843-9\_11.
- Mohammadi, G., Adorian, T. J., & Rafiee, G. (2020). Beneficial effects of *Bacillus subtilis* on water quality, growth, immune responses, endotoxemia and protection against lipopolysaccharide-induced damages in *Oreochromis niloticus* under biofloc technology system. *Aquaculture Nutrition*, 26(5), 1476-1492.
- Mohsin, M., Nawrot, N., Wojciechowska, E., Kuittinen, S., Szczepańska, K., Dembska, G., & Pappinen, A. (2023). Cadmium accumulation by *Phragmites australis* and *Iris pseudacorus* from stormwater in floating treatment wetlands microcosms: Insights into plant tolerance and utility for phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 331, 117339.
- Msaki, G. L., Njau, K. N., Treydte, A. C., & Lyimo, T. (2022). Social knowledge, attitudes, and perceptions on wastewater treatment, technologies, and reuse in Tanzania. *Water Reuse*, 12(2), 223-241.
- Muhammadar, A. A., Firdus, F., Muchlisin, Z. A., Samadi, S., Sarong, M. A., Boihaqi, B., ... & Batubara, A. S. (2021). Effect of dietary protein level on growth, food utilization, food conversion and survival rate of giant trevally (*Caranx ignobilis*). *F1000Research*, 10(78), 78.
- Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A. K. (2023). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2030082.
- Navarro-Chaparro, K., Rivera, P., & Sánchez, R. (2016). Análisis del manejo de agua en la ciudad de Tijuana, Baja California: Factores críticos y retos. *Estudios fronterizos*, 17(33), 53-82.
- Nuwansi, K. K. T., Verma, A. K., Chandrakant, M. H., Prabhath, G. P. W. A., & Peter, R. M. (2021). Optimization of stocking density of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) with gotukola (*Centella*

- asiatica) in an aquaponic system using phyto-remediated aquaculture wastewater. *Aquaculture*, 532, 735993.
- Nuwansi, K. K. T., Verma, A. K., Rathore, G., Prakash, C., Chandrakant, M. H., & Prabhath, G. P. W. A. (2019). Utilization of phyto-remediated aquaculture wastewater for production of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) and gotukola (*Centella asiatica*) in an aquaponics. *Aquaculture*, 507, 361-369.
- Organización de Naciones Unidas (ONU). (22 de Marzo de 2021). Asuntos económicos. Agua. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/03/1489832>. Disponible en: 15 de septiembre del 2021.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (14 de junio de 2019). Agua. Recuperado el 15 de septiembre del 2021, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1973). *Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Health Safeguards*, Technical Report Series no 517, World Health Organization, Geneva.
- Palm, E., Nissim, W. G., Mancuso, S., & Azzarello, E. (2021). Split-root investigation of the physiological response to heterogeneous elevated Zn exposure in poplar and willow. *Environmental and experimental botany*, 183, 104347.
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquacult. Int.* 26, 813–842. doi. org/10.1007/s10499-018-0249-z.
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30-50.
- Pritsa, T. S., Fotiadis, E. A. y Lolas, P. C. (2008). Tolerancia del maíz a la atrazina y cadmio y del girasol al cadmio en suelo y cultivo hidropónico. *Comunicaciones en ciencia del suelo y análisis de plantas*, 39 (7-8), 1168-1182.
- Rana, S., Bag, S. K., Golder, D., Roy, S. M., Pradhan, C., Jana, B. B. (2011). Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants. *Ecological Engineering*. 37(6), 981-988. doi:10.1016/j.ecoleng.2011.01.009.
- Rehling, F., Sandner, T. M., & Matthies, D. (2021). Biomass partitioning in response to intraspecific competition depends on nutrients and species characteristics: A study of 43 plant species. *Journal of Ecology*, 109(5), 2219-2233.

- Rojas-Remis, R., & Mendoza-Espinosa, L. (2015). Plantas de tratamiento de aguas residuales: una visión como sistema complejo. *Revista Iberoamericana Universitaria En Ambiente, Sociedad y Sustentabilidad (AMBIENS)*, (646), 179–199. <https://doi.org/2346-9269>
- Roosta, H. R. (2014). Comparison of the vegetative growth, ecophysiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic: aquaponic solutions. *Journal of Plant Nutrition*. 37:11, 1782-1803, doi: 10.1080/01904167.2014.890220.
- Rusănescu, C. O., Rusănescu, M., & Constantin, G. A. (2022). Wastewater management in agriculture. *Water*, 14(21), 3351.
- Saidi, N., Jabeur, C., & Bakhrouf, A. (2012). Using of the ornamental fish in wastewater biological treatment. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 40(5), 499-505.
- Salgado-Méndez, S., Gilabert-Alarcón, C., Daesslé, L. W., Mendoza-Espinosa, L., Avilés-Marín, S., & Stumpp, C. (2019). Short-term effects on agricultural soils irrigated with reclaimed water in Baja California, Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 102, 829-835.
- Schram, E., Roques, J. A., Abbink, W., Spanings, T., De Vries, P., Bierman, S., Van de Vis, H. & Flik, G. (2010). The impact of elevated water ammonia concentration on physiology, growth and feed intake of African catfish (*Clarias gariepinus*). *Aquaculture*, 306(1-4), 108-115.
- Secretaría de Turismo (SECTUR). (2018). *Programa Marco para Fomentar Acciones para Restablecer el Balance del Ciclo del Agua en Ensenada*. Obtenido de: <http://sistemas.sectur.gob.mx/dgots/03-ensenada.pdf>
- Sichula, J., Makasa, M. L., Nkonde, G. K., Kefi, A. S., & Katongo, C. (2011). Removal of ammonia from aquaculture water using maize cob activated carbon. *Malawi J Aquac Fish*, 1, 10-15.
- Silva, J., Torres, P. & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26 (2), 347-359. [Fecha de Consulta 22 de Septiembre de 2021]. ISSN: 0120-9965. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180314732020>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2022). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. (ed) FAO.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. (ed) FAO.
- Steiner A.A. (1984). The universal nutrient solution Proceedings of IWOSC 1984 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. pp 633–649

- Su, M. H., Azwar, E., Yang, Y., Sonne, C., Yek, P. N. Y., Liew, R. K., Cheng, C. K., Show P. L. & Lam, S. S. (2020). Simultaneous removal of toxic ammonia and lettuce cultivation in aquaponic system using microwave pyrolysis biochar. *Journal of hazardous materials*, 396, 122610.
- Szymańska, S., Lis, M. I., Piernik, A., & Hryniewicz, K. (2022). *Pseudomonas stutzeri* and *kushneria marisflavi* alleviate salinity stress-associated damages in barley, lettuce, and sunflower. *Frontiers in Microbiology*, 13, 788893.
- Teubner, D., Paulus, M., Veith, M., & Klein, R. (2015). Biometric parameters of the bream (*Abramis brama*) as indicators for long-term changes in fish health and environmental quality—data from the German ESB. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 1620-1627.
- Thorarinsdottir R, editor. (2015). *Aquaponics guidelines*. Reykjavik (Iceland): Haskolaprent, University of Iceland. 978-9935-9283-1-3
- Tomlinson, L., 2017. Indoor aquaponics in abandoned buildings: a potential solution to food deserts. *Sustainable Development Law & Policy*. 16(1), 5.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. Paris, UNESCO.
- Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A review on hydroponics and the technologies associated for medium-and small-scale operations. *Agriculture*, 12(5), 646.
- Villarroel, M., Miranda-de la Lama, G. C., Escobar-Álvarez, R., & Moratiel, R. (2022). Fish Welfare in Urban Aquaponics: Effects of Fertilizer for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) on Some Physiological Stress Indicators in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Water*, 14(6), 935.
- Vlahos, N., Levizou, E., Patsea, E., Tasiou, K., Berillis, P., Antonopoulou, E., ... & Mente, E. (2023). Salinity affects the efficiency of a brackish aquaponics system of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and rock samphire (*Crithmum maritimum*). *Aquaculture*, 571, 739493.
- Waller-Barrera, C., Mendoza-Espinosa, L., Medellín-Azuara, J., & Lund, J. R. (2009). Optimización económico-ingenieril del suministro agrícola y urbano: una aplicación de reúso del agua en Ensenada, Baja California, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 24(4), 87-103.
- Winpenny, J.; Heinz, I.; Koo-Oshima, S.; Salgot, M.; Collado, J.; Hernández, F.; Torricelli, R. (2013). *Reutilización del Agua en Agricultura: Beneficios para Todos*; FAO: Rome, Italy;

- Volome 124. Available online at: <http://www.fao.org/3/i1629s/i1629s.pdf>. (Acceso 11 de enero de 2024).
- World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- World Health Organization (WHO). (2024). Guidelines for drinking-water quality: small water supplies. Geneva: World Health Organization; 2024. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Wu F, Ghamkhar R, Ashton W, Hicks A (2019). Sustainable seafood and vegetable production: aquaponics as a potential opportunity in urban areas. *Integrated environmental assessment and management*, 15(6), 832-843.
- Yanes, A. R., Martinez, P., Ahmad, R. (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *J. Cleaner Prod.* 263, 121571. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571.
- Yang, T., & Kim, H. J. (2020). Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122619.
- Zimmermann, M., Fischer, M. (2020). Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *J. Water Reuse Desalinat.* 10(4), 431-442. doi: 10.2166/wrd.2020.026.
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Guimbaud, C., & Fang, Y. (2016). Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. *Bioresource technology*, 210, 81-87.

## **CAPÍTULO IV: AGRICULTURA URBANA PARA EL FORTALECIMIENTO DE LAS MUJERES EN MANEADERO, MÉXICO**

**Muñoz-Euán, Nayla<sup>1</sup>; De Luca Zuria, Ana <sup>3</sup>; Leyva, Claudia<sup>3</sup>; Villada-Canela, Mariana <sup>1</sup>; Rosales-Leija, Misael<sup>4</sup>; García-Gastelum, Alejandro <sup>2</sup> \*.**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México.

<sup>4</sup>Departamento de Acuicultura. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México

**\*Corresponding Email:** [agarcia@uabc.edu.mx](mailto:agarcia@uabc.edu.mx)

### **Resumen**

La urbanización ha incidido en la reclasificación de áreas rurales y zonas agrícolas a periurbanas o urbanas, lo cual ha incrementado la demanda de productos agrícolas, llegando como una estrategia novedosa la agricultura urbana (AU). A nivel mundial, la participación femenina en la fuerza laboral agrícola es significativa, alcanzando el 43% y superando el 60% en los países menos desarrollados. Sin embargo, persisten brechas de género en el sector agrícola, donde en México las mujeres representan solo el 10.7% de la fuerza laboral, con salarios inferiores a los de los hombres.

En este contexto, la AU, y en particular la hidroponía, ha surgido como una oportunidad para empoderar a las mujeres, ofreciendo acceso a recursos, capacitación y tecnología que favorecen su autonomía económica y social. Este estudio presenta el caso del proyecto "CASA" en la comunidad de El Veladero, Maneadero, Ensenada, que utiliza la hidroponía como un sistema sostenible de producción agrícola, promoviendo la seguridad alimentaria y el empoderamiento de las mujeres. A través de un enfoque de Investigación-Acción Participativa (IAP), se involucró a los participantes en cada etapa, desde la planificación hasta la implementación y análisis de resultados, priorizando sus experiencias y fomentando la creación de huertos sostenibles. La metodología se dividió en tres

fases: caracterización del área de estudio, desarrollo del proyecto CASA y análisis exhaustivo de los resultados.

El proyecto CASA impulsó la creación de huertos hidropónicos con materiales reciclados, como tarimas y botellas de plástico, empleando el método Kratky, y promovió que los participantes construyeran y gestionaran sus propios sistemas en sus hogares. Esta experiencia permitió a las mujeres desarrollar habilidades organizativas y agrícolas, reforzando su autonomía y capacidad para mejorar su entorno en un contexto de recursos limitados.

Además de los beneficios locales, el proyecto CASA se alinea con 16 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Sin embargo, el artículo reconoce que proyectos como CASA no pueden, por sí solos, resolver problemas profundos como la pobreza o la desigualdad de género, y enfatiza la necesidad de un apoyo continuo por parte de autoridades y gobiernos para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

En conclusión, el proyecto CASA ilustra cómo la AU puede ser una herramienta eficaz para el empoderamiento femenino y el desarrollo sostenible en comunidades vulnerables. La participación activa de las mujeres en la AU no solo contribuye a mejorar sus condiciones de vida, sino que también impulsa cambios significativos en la seguridad alimentaria y cohesión social. No obstante, se requiere un compromiso institucional para que iniciativas como esta puedan expandirse y generar un impacto duradero en las comunidades.

**Palabras clave:** Agricultura urbana, empoderamiento de mujeres, hidroponía, Objetivos de Desarrollo Sostenible.

## **Introducción**

La agricultura es la principal fuente de alimentos y una herramienta para erradicar la pobreza extrema. No obstante, consume cerca del 70% del agua dulce destinada al uso humano, porcentaje que en zonas áridas y semiáridas puede alcanzar hasta el 85% (FAO, 2017; Zimmermann y Fischer, 2020). A pesar de su relevancia, el sector agrícola es afectado por la estabilidad alimentaria global, como en el caso de la pérdida de un tercio de la producción de alimentos (World Bank, 2024).

Con este panorama, emerge la preocupación por los alimentos que consumimos y su impacto tanto en la salud como en el medio ambiente. Es así como, bajo este escenario, en conjunto con el uso intensivo de agroquímicos y las prácticas agrícolas industrializadas, se producen una serie de problemas ambientales y sociales. Además de contribuir a la degradación del suelo y la pérdida de recursos naturales, estas prácticas han excluido económicamente a las comunidades más vulnerables (Altieri & Nicholls, 2020).

Como respuesta a estos desafíos, la Agricultura Urbana (AU) ha surgido como una alternativa viable, especialmente en zonas marginadas donde el acceso a alimentos frescos y saludables es limitado y las redes de apoyo comunitario son esenciales. Desde finales de los años 70, la AU ha sido reconocida no solo por su capacidad para combatir la inseguridad alimentaria y nutricional, sino también por su potencial para fortalecer la cohesión social y fomentar la educación ambiental (Langemeyer et al., 2021; Bennedetti et al., 2023). Entre las prácticas más destacadas de la agricultura urbana se encuentran los sistemas de hidroponía, aeroponía y acuaponía, los cuales optimizan el uso de recursos limitados, como el agua y los fertilizantes, y han ganado popularidad en entornos urbanos (Diehl & Kaur, 2021; Somerville et al., 2022). Además, estas iniciativas han servido como una plataforma clave para el empoderamiento de las mujeres, quienes, a pesar de enfrentar diversas barreras en contextos urbanos, han asumido roles de liderazgo en la producción agrícola urbana (Poulsen et al., 2015; Carvalho & Bógus, 2020).

La urbanización ha incidido en la reclasificación de áreas rurales como periurbanas o urbanas, lo que, a su vez, ha incrementado la demanda de productos agrícolas (FAO, 2018a; FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO, 2023). Se proyecta que, para 2030, el 68 % de la población mundial vivirá en áreas urbanas (FAO, 2018a), lo que presenta serios desafíos para la seguridad alimentaria debido a la conversión de tierras agrícolas en zonas urbanizadas y la pérdida de áreas protegidas (Seto et al., 2011; Wang et al., 2021). México, que enfrenta una de las mayores tasas de deforestación a nivel mundial, es un claro ejemplo de esta problemática, con estimaciones que indican que el

83.2% de su población vivirá en zonas urbanas para el 2030 (Rosete et al., 2008; Zubicaray et al., 2021).

En la Península de Baja California (B.C.), este fenómeno ha impactado particularmente en áreas agrícolas clave como el Valle de Guadalupe y Maneadero en Ensenada (Lázaro, 2023). En Maneadero, específicamente en la AGEB “2870 El Veladero (Ejido Nacionalista)”, califica como zona de alto y muy alto grado de marginación (CONEVAL, 2022; DDC, 2024). Ante estas dificultades, se ha implementado en el área apoyos como el Programa de Salud y Bienestar Comunitario, en colaboración con el Sistema para el Desarrollo Integral de la Familia (SEDIF) de B.C., con el objetivo de restaurar el tejido social mediante el desarrollo integral de la comunidad (DDC, 2024). Para maximizar el impacto de este tipo de políticas, es fundamental incorporar enfoques que promuevan la equidad de género y respondan a las necesidades de los grupos más desfavorecidos (Dieleman, 2017).

En este contexto de urbanización acelerada, la participación de las mujeres en la hidroponía y otras prácticas de AU es crucial. Estas iniciativas no solo reconocen y valoran las habilidades de las mujeres, sino que también les ofrecen acceso a recursos, tecnología y capacitación, fomentando su empoderamiento económico y social. Las mujeres, al priorizar el bienestar familiar y comunitario en sus actividades, contribuyen a la creación de sistemas agrícolas más sostenibles y justos (FAO, 2011; Agarwal, 2014).

En México se han llevado a cabo esfuerzos para visibilizar a la agricultura urbana como una estrategia para el empoderamiento de las mujeres. En las zonas periféricas de la Ciudad de México, mujeres que antes trabajaban como empleadas domésticas recorriendo largas distancias, han encontrado en la Agricultura Urbana y Periurbana (AUP) una oportunidad para generar ingresos y cultivar alimentos para sus familias cerca de casa (FAO, 2008). Esta práctica no solo contribuyó al sustento económico, sino que les permitió equilibrar mejor sus responsabilidades familiares y laborales (FAO, 2008).

Por otro lado, en Puebla, el análisis de emprendimientos sociales como Taselotzin, Artemali y EL PIRA Hermanos, mostró cómo la acción colectiva liderada por mujeres en entornos rurales fortalece el respeto hacia su tiempo y espacio, destacando una relación profunda entre el emprendimiento social y el empoderamiento femenino (Villanueva & Villagómez, 2019).

Un estudio reciente en la zona periurbana de Mérida, Yucatán, también revela el impacto positivo de la AUP en el empoderamiento femenino. A través de huertos comunitarios en el fraccionamiento Las Américas, se puede observar el empoderamiento personal de las mujeres con

fines comunitarios potencia el empoderamiento colectivo, promoviendo un espacio de participación accesible para cualquier vecino (Montejo et al., 2023).

En los casos de la Ciudad de México, Puebla y Mérida evidencian que la agricultura urbana o periurbana, no solo proporciona medios de subsistencia y contribuye a la seguridad alimentaria, sino que también se convierte en una herramienta efectiva para el empoderamiento y la autonomía de las mujeres. Estos espacios comunitarios y emprendimientos fortalecen la acción colectiva y la participación activa, creando un círculo virtuoso donde la equidad de género y el desarrollo local convergen en beneficio de sus comunidades.

Es así como el objetivo del estudio, en línea con las iniciativas del SEDIF, fue promover el empoderamiento femenino comunitario mediante un proceso interdisciplinario que incentivara la participación activa de las mujeres, utilizando técnicas sostenibles de agricultura urbana. Se buscó lograr su integración informada y comprometida en la implementación del proyecto “Capacitación y Asesoramiento de Sistemas Agrícolas Sostenibles (CASA)”, que promueve la AU como una herramienta clave para el desarrollo sostenible y la cohesión social. El proyecto CASA fue desarrollado a principios de 2024 por un grupo de investigadores con el propósito de apoyar a grupos vulnerables e impulsar la protección ambiental, el uso eficiente de los recursos naturales y la seguridad alimentaria. Este proyecto se aborda desde un enfoque de Investigación-Acción Participativa (IAP) (Cornish et al., 2023) y mediante la implementación de herramientas y técnicas de la AU.

El proyecto CASA se basó en 9 de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030: ODS 2, Hambre cero; ODS 4, Educación de calidad; ODS 5, Igualdad de género; ODS6, Agua limpia y saneamiento; ODS 8, Trabajo decente y crecimiento económico; ODS 10, Reducción de desigualdades; ODS 11, Ciudades y comunidades sostenibles; ODS 12, Producción y consumo responsables; y ODS 13, Acción por el clima.

### ***Transformar la agricultura como clave para alcanzar los ODS***

El término "agricultura convencional" comenzó a ganar mayor relevancia en la literatura científica a principios de la década del 2000 (Pomoni et al., 2023). No obstante, Beus y Dunlap (1990) ya habían señalado previamente la diferenciación entre agricultores convencionales y alternativos, calificando a estos últimos como "radicales no científicos y sentimentalistas". La percepción de la agricultura convencional frente a la alternativa no se limita únicamente a los métodos de producción, sino también a las implicaciones de estas prácticas, como la desvinculación del agotamiento de recursos naturales, la proximidad geográfica en el cultivo (producción local) y la ampliación de la diversidad genética (Beus & Dunlap, 1990; Sumberg & Giller, 2022).

La agricultura convencional ha sido históricamente vinculada con el uso intensivo de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes químicos, lo que ha generado una serie de impactos negativos tanto en la salud humana como en el medio ambiente (Foteinis & Chatzisyneon, 2016; Pomoni et al., 2023). Estas prácticas han contribuido a la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad, creando una presión insostenible sobre los ecosistemas. En contraposición, las técnicas agrícolas alternativas buscan una mayor sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos naturales, promoviendo la desvinculación entre el crecimiento económico y el deterioro ambiental. Estas alternativas se alinean con los principios de la sostenibilidad, favoreciendo el bienestar humano a largo plazo.

Un ejemplo destacado de esta transformación es la AU, una modalidad innovadora que está cobrando relevancia por su capacidad para mejorar la sostenibilidad en la producción de alimentos. La AU fomenta la producción local, reduciendo la huella de carbono asociada al transporte de alimentos y mejorando el acceso a productos frescos.

Entre las técnicas de AU más relevantes, la hidroponía ha emergido como una solución innovadora para optimizar el uso de recursos en la producción de alimentos sin la necesidad de suelo. A diferencia de la agricultura tradicional, la hidroponía emplea soluciones nutritivas en sistemas controlados, lo que permite una mayor eficiencia en el uso del agua—reduciendo su consumo en hasta un 90 %—y elimina la dependencia de plaguicidas y herbicidas (Resh, 2013). Esta técnica es particularmente adecuada para entornos urbanos y regiones con escasez de agua, donde la agricultura convencional no es viable (Despommier, 2010). Además, los sistemas cerrados que se utilizan en la hidroponía permiten el reciclaje continuo de agua y nutrientes, minimizando el desperdicio y los costos de producción (Tyson et al., 2001).

La adopción de prácticas sostenibles, como el uso de energías renovables y el control biológico de plagas, posiciona a técnicas agrícolas como la acuaponía y la hidroponía como herramientas clave para el desarrollo de sistemas alimentarios más resilientes y ecológicos, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Goldstein et al., 2016; Langemeyer et al., 2021; Muñoz-Euán et al., 2024). Estas técnicas no solo contribuyen a la seguridad alimentaria, sino también a la sostenibilidad ambiental, siendo un componente esencial en la transición hacia una agricultura más sostenible (Bernstein, 2011).

En este contexto, la Agenda 2030 destaca la agricultura como un sector esencial para alcanzar los ODS, en particular el ODS 2. Sin embargo, su impacto abarca de manera directa e indirecta los 17 ODS, ya que la transición hacia prácticas agrícolas sostenibles tiene el potencial de influir en múltiples dimensiones del desarrollo, incluyendo la erradicación de la pobreza, la protección de los recursos naturales y la mitigación del cambio climático. La AU, con sus múltiples beneficios y su capacidad para integrarse en entornos urbanos, se presenta como una solución innovadora y alineada con los principios de sostenibilidad, contribuyendo de manera significativa al cumplimiento de los ODS (Fig. 1).



**Figura 1. Contribuciones de la agricultura urbana a los ODS.** Fuentes: Hovorka, 2006; Battersby & Marshak, 2013; Orsini et al., 2013; Specht et al., 2014; Poulsen et al., 2015; Warren et al., 2015; Wright & Annes, 2016; Dieleman, 2017; Caputo et al., 2020; Skar et al., 2020; Kirby et al., 2021; Langemeyer et al., 2021; Scheromm et al., 2021; Whittinghill & Sarr, 2021; Cerozi et al., 2022; Colson-Fearon & Versey, 2022; Gumisiriza et al., 2022; Ilieva et al., 2022; Van Nieuwkoop et al., 2022; Bennedetti et al., 2023; Mietz, et al., 2024

### ***Agricultura urbana sostenible con perspectiva de género***

A nivel mundial, las mujeres representan el 43% de la fuerza laboral agrícola, cifra que asciende a más del 60% en los países menos desarrollados (Van Nieuwkoop et al., 2022). Sin embargo, las mujeres ganan un 18.4% menos que los hombres, lo que equivale a recibir 82 centavos por cada dólar que los hombres perciben (FAO, 2023). A pesar de su significativa participación en la fuerza laboral agrícola, el 85% de los hombres poseen derechos de propiedad o tenencia segura sobre tierras agrícolas, mientras que menos del 15% de las tierras están en manos de mujeres (FAO, 2018 b).

En México, los hombres ocupan el 89.3 % de los puestos de trabajo como jornaleros agrícolas, mientras que las mujeres representan solo el 10.7 %, donde el pago promedio por jornada laboral es de 201 pesos para las mujeres y 228 pesos para los hombres, según datos obtenidos en al menos 26 entidades federativas (INEGI, 2024).

Esta situación evidencia la persistente brecha de género en el sector agrícola, una realidad que se replica en diversas regiones del mundo y que contribuye a perpetuar la desigualdad, la discriminación y condiciones laborales inadecuadas. Esto contraviene no solo el ODS 5, que busca promover la igualdad de género, sino también el ODS 2, que aboga por erradicar el hambre, y el ODS 8, que fomenta el trabajo decente y el crecimiento económico, entre otros (OECD, 2021, UN, 2023).

El empoderamiento de las mujeres es una prioridad a nivel mundial (Crookston et al., 2021), lo que ha impulsado diversos esfuerzos para promoverlo. Una de las estrategias más efectivas ha sido la AU, que no solo contribuye a la seguridad alimentaria, sino que también reduce desigualdades y amplía las oportunidades económicas y sociales de las mujeres. Un ejemplo destacado es el programa 'The Urban Agriculture Program for HIV/AIDS-Affected Women' en Addis Abeba, cuyo objetivo es mejorar los ingresos y empoderar a las mujeres afectadas por el VIH/SIDA (Warren et al., 2015). En contraste, en Louisville, Kentucky se entrevistaron a productores agrícolas urbanos, donde la mayoría eran mujeres (53%), donde sus motivaciones eran por pasatiempo/ocio, consumo personal o no comercial (60%) y las restantes con fines de lucro, así como proporcionar oportunidades educativas a la comunidad y fomentar reuniones comunitarias y sociales (Whittinghill & Sarr, 2021).

Los huertos urbanos donde se implementa la acuaponía o hidroponía, pueden ser herramientas clave para mejorar esta situación. Al no depender directamente del acceso a la tierra, esta tecnología puede proporcionar a las mujeres nuevas oportunidades para ser propietarias y gestoras de sus propios sistemas productivos. Además, su menor requerimiento de insumos tradicionales y su

capacidad para operar en espacios reducidos facilitan su implementación en entornos urbanos y rurales por igual, empoderando a las mujeres a través de la tecnología y mejorando su seguridad económica y alimentaria.

Además, los huertos urbanos han sido considerados espacios seguros para mujeres y niños, proporcionando un entorno recreativo alejado de las amenazas que se pueden suscitar en vecindarios de bajos ingresos (Battersby & Marshak, 2013). Alrededor del 65% de los agricultores urbanos son mujeres (Orsini et al., 2013). Esta actividad ha sido promovida debido a su capacidad para fortalecer la inclusión social; reducir las desigualdades de género; empoderar a las mujeres; proporcionar capacitación laboral para jóvenes y adultos; facilitar el acceso a alimentos frescos, asequibles y culturalmente apropiados en comunidades de bajos ingresos; contribuir al mantenimiento de espacios verdes en entornos urbanizados; y fomentar el desarrollo económico tanto en los hogares como en las comunidades (Orsini et al., 2013; Reynolds, 2015; Anderson et al., 2021).

### **Metodología**

Este estudio considero el enfoque de IAP, integrando investigación, colaboración, reflexión y acción para priorizar la experiencia de las comunidades afectadas, generar conocimientos aplicados y dar voz a actores tradicionalmente excluidos (Méndez et al., 2013; Cornish et al., 2023). Este tipo de enfoques se proponen para lo relacionado a la comprensión de la ecología de los sistemas agrícolas tradicionales y los desafíos agrícolas o sociales emergentes (Neef & Neubert, 2011; Méndez et al. 2013; Paganini & Stöber, 2021).

La ruta metodológica que se propuso en este estudio se dividió en tres momentos (Fig. 2). En marzo de este año, se realizó una visita inicial facilitada por una tallerista con experiencia previa en la comunidad, enfocándose especialmente en las mujeres. Las actividades anteriores incluyeron el reciclaje de llantas y la creación de arte con botellas de vino.

En el primer momento (A), se llevó a cabo la descripción y caracterización del área de estudio, lo cual incluyó una revisión bibliográfica sobre la región y toma de datos a través de observación de campo. El segundo momento (B) fue la puesta en marcha del proyecto CASA (Fig. 2), que consistió en cinco fases: (B.1) Acercamiento e integración en la comunidad, (B.2) Conocer las condiciones sociales de las participantes, (B.3) Desarrollo de conceptos relacionados a los sistemas agrícolas sostenibles, (B.4) Asesoramiento en la implementación de sistemas agrícolas sostenibles, y (B.5) Evaluación final de las intervenciones y resultados obtenidos.

En el último momento (C) (Fig. 2), se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los datos recolectados, seguido de una interpretación detallada para extraer conclusiones del estudio.

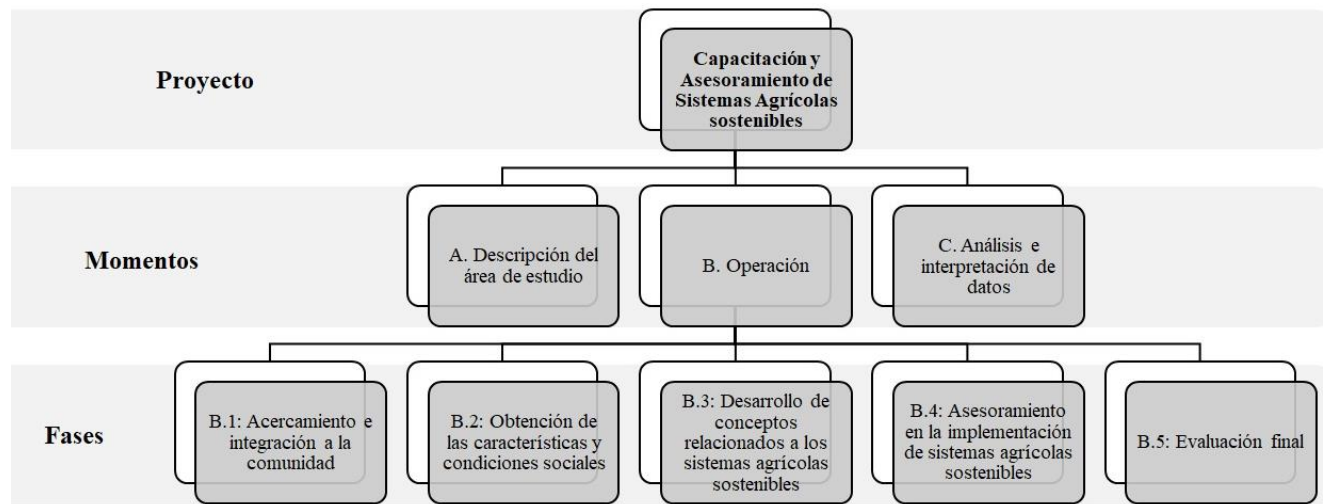


Figura 2. Desarrollo metodológico

### A. Área de estudio

La localidad de Rodolfo Sánchez Taboada (Maneadero) (Fig. 3), es la segunda más poblada del municipio de Ensenada, B.C., con aproximadamente 27,969 habitantes (COPLADEM, 2024). Se destaca por ser una importante zona agrícola del estado, lo que ha promovido un crecimiento de la población migrante en la región (Garduño et al., 2011; Lázaro, 2023). La zona presenta una temperatura promedio anual de 16.8 °C y una precipitación de 231.5 mm (CONAGUA, 2024). El acuífero, con una extensión aproximada de 130 km<sup>2</sup>, es una fuente crucial de abastecimiento de agua para las localidades de Ensenada y Maneadero (Gilabert-Alarcón et al., 2018; Elizondo & Mendoza-Espinosa, 2020).

En las periferias de esta localidad se encuentran varias colonias, entre ellas “El Veladero”, que se encuentra a lado de zonas con alto y muy alto grado de rezago social (CONEVAL, 2022). En esta colonia se contabilizaron, hasta el año 2020, alrededor de 612 personas (INEGI, 2020). Dentro de esta colonia se ubica el parque “Mundo divertido”, que sirve como punto de reunión para numerosas familias tanto del Veladero como de colonias aledañas.

A pesar de que las viviendas alrededor del parque "Mundo Divertido" llevan alrededor de 20 años establecidas, no se encuentran dentro de los Perímetros de Contención Urbana. Estas residencias están ubicadas a casi 1 kilómetro del área urbana consolidada, la cual es priorizada para

la asignación de subsidios relacionados con empleo (U1), servicios (U2) y áreas de crecimiento contiguas a la zona urbana consolidada (U3) (Conavi, 2018).

Hace poco más de dos años, los habitantes de la colonia colaboraron en el diseño y construcción del parque, convirtiéndolo en un espacio para la reunión, recreación y esparcimiento de la comunidad. Este parque resultó beneficiado del Programa de Salud y Bienestar Comunitario en coordinación con el Sistema para el Desarrollo Integral de la Familia de B.C. (SEDIF), el nombre particular del proyecto se tituló “Entrenamiento deportivo para niñas, niños y jóvenes, 2023”.

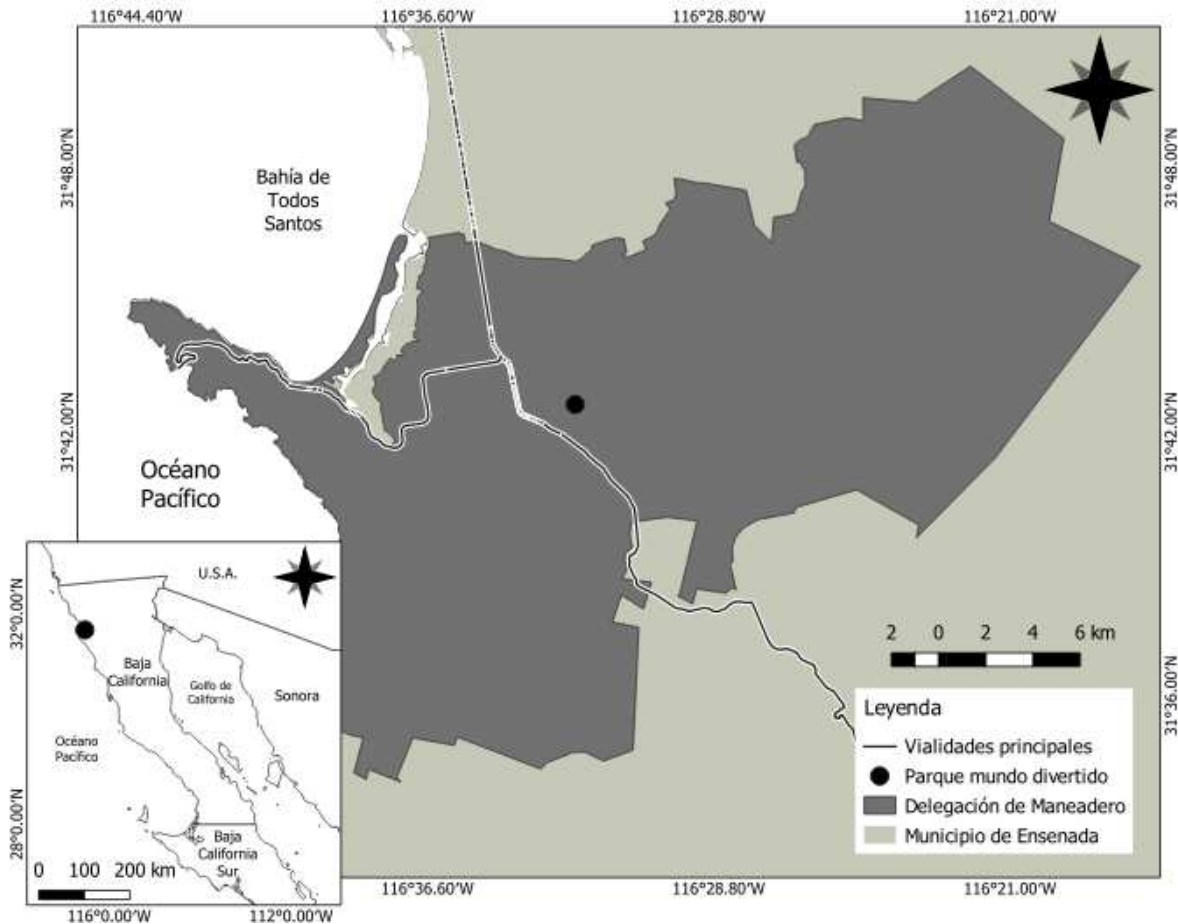


Figura 3. Ubicación geográfica de la zona de estudio

### ***B. Operación del proyecto CASA***

Esta etapa de la investigación se llevó a cabo de marzo a julio del presente año. La metodología del proyecto CASA se enfocó en promover el empoderamiento de las mujeres participantes mediante una comunicación activa, participativa y organizacional. El proyecto se estructuró en cinco fases (Fig. 2).

### ***Fase B.1: Acercamiento e integración a la comunidad***

Dentro de la Fase B.1 (Fig. 2), se realizó observación participante (Vargas, 2011; Carvalho & Bógus, 2020), con el propósito de integrarse y conocer de manera inmersiva la dinámica de trabajo y las interacciones sociales del grupo. A través de esta metodología, se buscó no solo comprender las prácticas y relaciones cotidianas de las participantes, sino también analizar cómo se estructuran las redes de apoyo comunitario. Las mujeres de la comunidad, aproximadamente 20 integrantes, se reúnen cada miércoles en un espacio destinado a la toma de decisiones comunitarias y al desarrollo de habilidades. En estos encuentros semanales, el grupo colabora en la organización de la colonia y en la planificación de eventos de recaudación de fondos en beneficio de la comunidad.

A través de talleres y sesiones colaborativas, las mujeres aprenden herramientas prácticas que les permiten gestionar mejor las necesidades de la colonia, planificar eventos de recaudación de fondos y participar en la mejora de su entorno. Este espacio no solo fomenta la adquisición de conocimientos técnicos, sino que también fortalece el empoderamiento colectivo, al proporcionar un lugar donde las mujeres pueden debatir y construir estrategias comunitarias, mientras profundizan sus relaciones interpersonales y su agencia dentro de la comunidad.

### ***Fase B.2: Obtención de las características y condiciones sociales***

#### **- Entrevistas a las mujeres**

Dentro de la comunidad, hay un grupo de mujeres responsable de la gestión de actividades en el parque. Este grupo está conformado en su mayoría por madres de familia que viven en la comunidad. Cada año dentro del grupo se forma un comité de tres integrantes, por lo que se entrevistó tanto al comité actual como al que asumirá funciones en los próximos meses. El propósito de este comité es la toma de decisiones, la representación de los intereses de la comunidad y servir como enlace entre los vecinos y las autoridades municipales u otras organizaciones. A inicios del mes de abril del año presente, se organizó una reunión donde se entrevistó a cinco de las seis mujeres (Fase B.2), ya que una de las integrantes del comité actual dejó de participar en el grupo.

Con esta entrevista se obtuvo su tiempo de residencia en la colonia “El Veladero”, la dinámica organizativa del grupo, las necesidades comunitarias, su participación en talleres o actividades previas, los planes futuros para la colonia, y la identificación de elementos comunes entre ellas (Vargas, 2011; Pollard et al., 2017; Caputo et al., 2020). Se logró identificar cuatro temas principales en la entrevista: necesidades de la colonia, motivaciones para participar en actividades y talleres, tema (s) específico (s) para explorar o profundizar y proyección de la colonia a futuro (Tabla 1).

Tabla 1. Temas principales y recopilados que surgieron en la entrevista.

Temas de la entrevista	Temas emergentes recopilados
Necesidades de la colonia	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Recolección de basura</li> <li>● Suministro de servicios: agua, drenaje, electricidad...</li> <li>● Información nutricional</li> <li>● Huertos urbanos</li> <li>● Control de perros callejeros</li> <li>● Reciclaje</li> <li>● Reparación de calles</li> <li>● Inseguridad social</li> <li>● Inseguridad alimentaria</li> </ul>
Motivaciones para participar en actividades y talleres	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Razones medioambientales</li> <li>● Ventajas económicas</li> <li>● Beneficios a nivel individual, familiar y comunitario</li> <li>● Adquisición de conocimientos</li> <li>● Cohesión social</li> <li>● Emprendimiento</li> </ul>
Tema (s) específico para explorar o profundizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Técnicas de cultivo y cuidado de plantas</li> <li>● Principios de nutrición</li> <li>● Métodos inclusivos para niños con discapacidad</li> </ul>
Proyección de la colonia a futuro	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Servicios</li> <li>● Ampliación</li> <li>● Orden y limpieza</li> <li>● Zonas de recreación</li> <li>● Huertos urbanos</li> </ul>

- Encuesta semiestructurada dirigida a las mujeres participantes

A partir de los resultados de las entrevistas y en función del objetivo del proyecto (Fase B.2), se elaboró una encuesta semiestructurada, la cual fue aplicada a nueve mujeres interesadas en elaborar su sistema agrícola sostenible. El objetivo de esta encuesta fue recopilar datos personales y de vivienda, así como información sobre la colonia, sus necesidades sociales, experiencias previas y expectativas del proyecto. El análisis de esta encuesta se realizó con una metodología mixta, utilizando reactivos tanto cualitativos como cuantitativos (Vargas, 2011; Caputo et al., 2020).

### ***Fase B.3: Capacitación y desarrollo de conceptos***

Durante esta fase, se realizaron tres sesiones formativas de entre dos y tres horas cada una, enfocadas en dos áreas clave: los principios y prácticas de la agricultura sostenible y la autoorganización comunitaria. En cada sesión se elaboró una lluvia de ideas, que eran registradas temáticamente (Rich et al., 2018). Se utilizaron una variedad de juegos y experimentos didácticos para facilitar una comunicación más efectiva y la construcción de conceptos clave (Fig. 2) (Hernández-Aguilera et al., 2020). Por ejemplo, se empleó un juego de memoria para introducir el concepto de "desarrollo sostenible". La "importancia de la vegetación" se ilustró mediante maquetas que simulan la infiltración del agua en los mantos acuíferos. La "calidad del agua" se abordó mediante la medición de la calidad del agua de los hogares utilizando API Kit de Prueba Máster colorimétricos y sondas multiparamétricas (Hernández-Aguilera et al., 2020; Bautista-Olivas et al., 2024). Además, se exploraron conceptos relacionados con sistemas agrícolas sostenibles, incluyendo variantes como la hidroponía, aeroponía y acuaponía (Pollard et al., 2017; Mietz et al., 2024).

### ***Fase B.4: Asesoramiento y codiseño de sistemas agrícolas sostenibles***

La implementación de sistemas agrícolas sostenibles comenzó con la creación de un huerto comunitario en el parque Mundo Divertido. Dado que el parque carece de suministro eléctrico, se optó por hidroponía con el método Kratky (Gumisiriza et al., 2022). Se utilizaron materiales reciclados, como botellas PET, vasos de plástico (de gelatinas u otros alimentos), y otros tipos de materiales plásticos, además de tarimas de madera.

Para la elaboración del sistema hidropónico comunitario, se contó con la participación de entre 9 y 14 mujeres en cada sesión. La creación del sistema requirió aproximadamente de tres a cuatro sesiones, con una duración de tres a cuatro horas cada una. Al final, se elaboraron dos unidades hidropónicas empleando el método Kratky (Fig. 4 y 5).



*Figura 4. Participantes en el parque mundo divertido. Las participantes sembraron las plantas para el sistema agrícola comunitario.*



*Figura 5. Sistema de hidroponía comunitario por el método Kratky.*

De las 9 a 14 integrantes que participaron regularmente en la elaboración del sistema hidropónico comunitario, 9 de ellas mostraron interés y diseñaron sus propios sistemas bajo el método Kratky (Fig.6), según sus posibilidades de materiales, espacio y tiempo, imprimiendo su creatividad en cada uno. Para la elaboración de los sistemas hidropónicos y aeropónicos individuales, se realizaron dos sesiones grupales de tres a cuatro horas cada una, y una sesión individual para el trasplante de plantas con duración de dos a tres horas. Las plantas y otros insumos como las tarimas de maderas fueron donadas por diversas personas y empresas del sector privado.



**Figura 6. Sistemas de agricultura sostenible codiseñados por las participantes. a) Sistema de hidroponía. b) Sistema de aeroponía.**

### ***Fase B.5: Evaluación final***

Al concluir la implementación de los sistemas individuales, se entrevistó a las nueve participantes para obtener su percepción sobre la experiencia en la implementación tanto del huerto comunitario como del individual (Pollard et al., 2017; Caputo et al., 2020). Además, se les solicitó sugerencias, recomendaciones y la identificación de áreas de oportunidad en el proyecto. También se indagó sobre los beneficios percibidos a lo largo del proceso.

### ***C. Análisis e interpretación de datos***

De la aplicación de las entrevistas y encuestas se obtuvieron diversos datos, los cuales fueron filtrados y corregidos para detectar errores o respuestas faltantes antes del análisis (Whittinghill & Sarr, 2021). Las respuestas cuantitativas fueron procesadas mediante Excel de Microsoft<sup>®</sup>, donde se generó una base de datos estructurada. Posteriormente, se categorizaron y contabilizaron utilizando las funciones del programa para obtener la estadística descriptiva básica (Gumisiriza et al., 2022).

Para las respuestas cualitativas, tanto lo obtenido en la observación participativa durante todo el proceso (B) y las entrevistas y encuestas se realizó un análisis temático (Carvalho & Bógus, 2020; Colson-Fearon & Versey, 2022; Hamilton et al., 2023 a), considerando las fases y criterios de Braun & Clarke (2006).

## **Resultados y discusiones**

### ***Análisis descriptivo de los factores socioeconómicos y experiencias previas de las participantes que implementaron un sistema agrícola sostenible***

Un total de 9 mujeres participaron en este proyecto, con edades predominantemente entre 30 y 59 años, en consonancia con las estadísticas nacionales (INEGI, 2023 a). La mayoría de las mujeres (77.8%) tiene un nivel educativo básico, lo cual es similar a las cifras nacionales (49.3%) y estatales (47.5%) (INEGI, 2021). El 55.6% de las participantes son originarias de B.C., mientras que el resto proviene de otros estados como Jalisco, Guanajuato, Guerrero y Oaxaca, similar al 43.1% de la población femenina nacida en otra entidad según datos del INEGI (2023b).

Todas (100%) las participantes son mujeres dedicadas al hogar, responsables principales de la gestión y el cuidado de la familia. La gran mayoría (88.9%) ya había participado en talleres de reciclaje de llantas, elaboración de atrapasueños, piñatas y otras manualidades. Asimismo, todas ya habían tenido experiencia con el cultivo de plantas (Tabla 2). Como fertilizantes o nutrientes para las plantas, se utilizan en su mayoría naturales, como cáscara de huevo o composta (Tabla 2). Como insecticida o repelente de insectos utilizan del tipo químico o agua con algún jabón biodegradable.

El uso de productos inorgánicos o químicos representa un riesgo tanto para el medio ambiente como para los usuarios (Gomiero, 2018; Mietz et al., 2024). Las sustancias químicas presentes en fertilizantes y plaguicidas sintéticos pueden contaminar el agua, el suelo, así como contribuir al cambio climático (Szekely & Jijakli, 2022; Pomoni et al., 2023). Además, quienes los aplican están expuestos a diversos problemas de salud, que van desde irritaciones oculares y dérmicas hasta condiciones más graves como cáncer, enfermedades renales, osteoporosis e infecciones resistentes a los antibióticos (Gomiero, 2018; Pantanella, 2018). En contraste, sistemas como la hidroponía y la acuaponía optimizan el uso de nutrientes y minimizan la generación de desechos, lo que los hace más eficientes en comparación con la agricultura convencional (Hamilton et al., 2023 a; Pomoni et al., 2023). Estos métodos no solo aumentan la producción y el rendimiento, sino que también reducen la liberación de productos químicos al medio ambiente, contribuyendo así a una práctica agrícola más sostenible (Gomiero, 2018; Grard et al., 2018; Hamilton et al., 2023 a).

Tabla 2. Análisis descriptivo de los factores socioeconómicos y experiencias previas vinculados con el trabajo en grupo y el cultivo de plantas.

Factor	Grupo	Frecuencia	Porcentaje
Tiempo de residencia en su domicilio actual	0 a 2 años	2	22.2
	3 a 5 años	1	11.1
	6 a 10 años	4	44.4
	11 a 15 años	1	11.1
	16 a 20 años	1	11.1
Participación en actividades o talleres en grupo	Si	8	88.9
	No	1	11.1
Tipo de fertilizantes o nutrientes para las plantas que utilizan:	Naturales, orgánicos	4	44.4
	Inorgánicos	2	22.2
	Orgánicos e inorgánicos	2	22.2
	No especificado	1	11.1
Repelentes de insectos para las plantas	Natural	1	11.1
	Químicos	3	33.3
	Naturales y/o biodegradables	3	33.3
	Ninguno	1	11.1
	No especificado	1	11.1

### ***Acerca de la colonia y sus necesidades***

De acuerdo con las mujeres que participaron en el proyecto CASA, la colonia “El Veladero” tiene por lo menos 20 años que se fundó. El parque “Mundo divertido”, es relativamente nuevo con alrededor de tres años. En ese mismo periodo, las mujeres de la colonia han trabajado en grupo y comités, llegando a acuerdos para diversas actividades en la colonia.

Dentro de las necesidades en la colonia (Tabla 1) consideran que las tres más urgentes son la 1) servicios en la vivienda, 2) reparación de calles, y 3) la recolección de basura.

### ***Motivaciones en la participación de actividades y talleres, incluido el proyecto CASA***

La mayoría de las participantes (88.9%) han estado involucradas en diversas actividades y talleres realizados en la colonia. Además, este proyecto ha logrado la incorporación de una nueva integrante al grupo. Entre las principales motivaciones que han tenido para participar en actividades o talleres en grupo son el aprendizaje, cuidado de las plantas, convivir, optimizar y crecimiento personal. La

motivación se define como el impulso interno de una persona orientado a satisfacer sus necesidades, lo cual está relacionado con su comportamiento (Trendov, 2018; Rahdriawan & Arriani, 2020). La convivencia, el esparcimiento y la recreación han sido motivaciones comunes para establecer huertos comunitarios urbanos (Trendov, 2018).

La convivencia y la socialización son de los motores frecuentes en este tipo de proyectos de agricultura urbana colectiva, que a su vez se relaciona con mejores impactos en el bienestar (Yap, 2019; Kirby et al, 2021). Asimismo, para este proyecto se encontró que las motivaciones son similares entre las mujeres participantes y pueden relacionarse con diferentes servicios ecosistémicos. Los servicios ecosistémicos que se valoran en este proyecto son de regulación (relacionado con la sombra que las plantas pueden proporcionar), salud y nutrición (referente a una alimentación con productos vegetales y las aplicaciones de las plantas medicinales) y autocultivo (el cultivo de los alimentos propios y su autoconsumo), que a su vez se le puede atribuir un valor económico tanto por el ahorro de dinero como una posible fuente de autoempleo (Grard et al., 2018; Elliot et al., 2022).

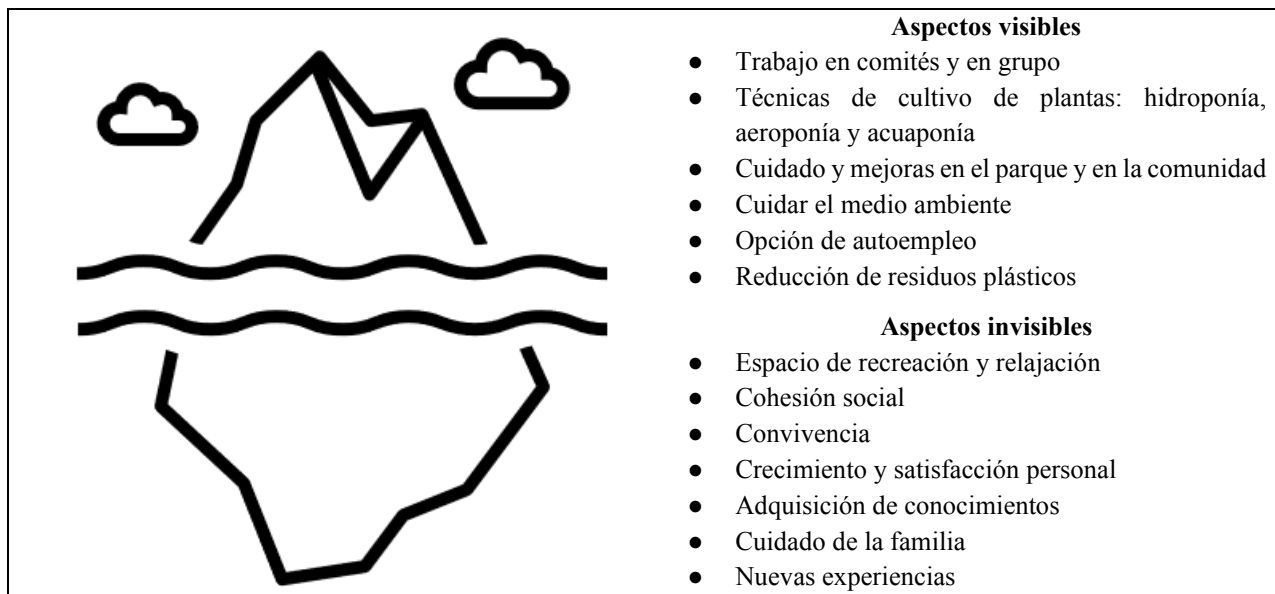
Otros servicios ecosistémicos, de manera directa o indirecta, y de acuerdo con la observación participante, son los servicios sociales, como la reducción de desechos, educación pública, y la convivencia (Grard et al., 2018; Filho et al., 2020; Carvalho & Bógus, 2020; Kirby et al, 2021).

La familia emerge como la principal motivación para implementar un huerto en el hogar; sin embargo, esta iniciativa trasciende el ámbito familiar y también está impulsada por el deseo de mejorar el bienestar comunitario. La visión hacia este tipo de proyectos se fundamenta en la búsqueda de autonomía alimentaria, mejoría en la salud, educación, ahorro económico y sostenibilidad. Estos beneficios esperados han sido ampliamente documentados en estudios previos sobre agricultura urbana, que destacan cómo estas prácticas no solo contribuyen a la seguridad alimentaria y la autosuficiencia, sino también a la cohesión social y la resiliencia económica de las comunidades (Setälä et al., 2013; Trendov, 2018; Ilieva et al., 2022). Además, estos huertos actúan como espacios educativos y de empoderamiento, fomentando prácticas sostenibles que pueden tener impactos positivos tanto a nivel individual como colectivo.

Durante la elaboración del proyecto se exploró la cultura organizacional de las participantes, tanto los aspectos visibles como los invisibles que dan forma a las dinámicas del grupo. Los aspectos visibles e invisibles de la cultura organizacional de las participantes se evaluaron desde el concepto de comportamiento organizacional, entendido como el estudio del comportamiento de los individuos en organizaciones (Chiavenato, 2009; Uhl-Bien et al., 2023). A través de las observaciones directas

en campo, encuestas y entrevistas, se distinguieron los aspectos visibles y superficiales (objetivos, métodos y procedimientos de trabajo, tecnología, en general aspectos físicos), así como los invisibles (percepciones, actitudes, normas, interacciones, aquello que influye en el comportamiento, aspectos profundos) (Fig. 7) (Chiavenato, 2009).

Este análisis permitió identificar diversos aspectos visibles e invisibles que influyen en sus dinámicas. Entre los aspectos visibles, se observó una fuerte participación en comités y trabajo en grupo. También destacan el cuidado y las mejoras del entorno comunitario, el cuidado ambiental, la creación de oportunidades de autoempleo y la reducción de residuos plásticos. Por otro lado, los aspectos invisibles revelaron elementos menos evidentes pero esenciales, como la creación de un espacio de recreación y relajación, la cohesión social que se fortalece a través de la convivencia, el crecimiento personal y la adquisición de nuevos conocimientos. Además, las participantes valoran el cuidado de la familia y la posibilidad de experimentar nuevas vivencias dentro de este espacio comunitario, lo que contribuye al bienestar colectivo y a su desarrollo individual.



**Figura 7. Iceberg de los aspectos visibles e invisibles del comportamiento organizacional de las participantes en el proyecto CASA**

**Percepción de las participantes durante el proyecto (Entrevista final)**

Los huertos comunitarios y la agricultura urbana son una oportunidad para el fortalecimiento de las comunidades, permite la unión de los residentes, además representan valores sociales ambientales (Scherom et al 2015; Grard, et al., 2018; Trendov, 2018). Scheron y colaboradores (2015) establecen que las funciones que brindan los huertos comunitarios no se limitan a la producción, sino que

integran roles sociales, terapéuticos, ambientales, de ordenamiento urbano, incluso mejora el entorno vital. De acuerdo con lo observado en este estudio, el espacio que abrió en cada sesión permitió que las participantes expresaran sus sentimientos y emociones, principalmente se encontraban satisfechas, interesadas, contentas, relajadas y emocionadas.

La agricultura urbana, los huertos comunitarios son lugares de aprendizaje (Trendov, 2018; Ilieva et al., 2022), y en este proyecto no fue la excepción. En las sesiones se trataron diferentes temas y de manera colectiva se construyeron conceptos. El tema que obtuvo mayor interés *a posteriori* fue lo relacionado a la calidad del agua (66.7%), lo que guarda relación con los principios de estas tecnologías es el uso eficiente del agua y los nutrientes (Gumisiriza et al., 2022; Mietz et al., 2024), y desde luego, con su contexto socioambiental y a las características del Estado donde viven.

La población del Estado de B.C. se abastece de agua a través de fuentes superficiales y subterráneas. El grado de presión de la Región Hidrológica Administrativa I (Península de Baja California) en el 2017 fue de 81.3% y se prevé que para el año 2030 aumente a 95.4%. Para ese año, se requerirán nuevas fuentes de aprovisionamiento de agua (CONAGUA, 2018; Cortés-Ruiz & Azuz-Adeath, 2021). Asimismo, dentro de esta región, hay alrededor de 12 acuíferos que presentan condición de sobre concesión, sobreexplotación y salinización, dentro de los cuales se encontraba en la zona de Maneadero (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Baja California, 2022; CONAGUA, 2024). También se considera que el acuífero se encontraba en serio peligro de contaminación, por el alarmante incremento de la extracción que causó su sobreexplotación y la intrusión marina, lo que llevaría a disminuir su tiempo de vida (CONAGUA, 2024).

Por otro lado, las participantes sugirieron que parte de lo que debe revisar a fondo es lo relacionado con el cuidado particular de diferentes variedades, también se mostraron interesadas en conocer acerca de diferentes nutrientes y fertilizantes, y cómo elaborarlos de manera casera y orgánica.

Considerando el empleo de materiales a los que se les dio un segundo uso, fueron muy bien aceptados, además de estar dispuestas a continuar empleándolos para proyectos futuros. No percibieron alguna preocupación sobre su calidad o durabilidad de los materiales reciclados en comparación con los materiales nuevos. El empleo de materiales de un solo uso no es algo nuevo, sin embargo, estos se utilizan después de darles un tratamiento y convertirlas como por ejemplo en fibras de botellas PET recicladas (fibra RPET) (Bui et al., 2018). El empleo directo de botellas de plástico PET en el cultivo de plantas, se ha promovido como una aplicación innovadora, brindando

un diseño bioclimático a las casas, mientras se obtiene un ahorro económico significativo (Jalaluddin, 2017).




Otros beneficios encontrados en empleo del reciclado de materiales para este proyecto en particular es el reducir la contaminación, cuidar el medio ambiente, producción de productos vegetales, satisfacción y felicidad, y por lo económico y fácil de utilizar. Aunque el empleo de materiales plásticos es común en agricultura, sólo representan una pequeña parte del uso total en comparación de su uso en construcción, edificación o consumo como envases desechables, se llega a producir a nivel mundial alrededor entre 2 y 6.5 millones de toneladas de Residuos plásticos agrícolas (Agricultural plastics waste, APW) (Muisse et al., 2016).

En Sicilia, Italia donde más de 200 ha están dedicadas a la producción de fresas el uso de plásticos, como macetas y bandejas, sistemas de riego, enmiendas de suelo y contenedores plásticos para pesticidas y fertilizantes, ha jugado un papel importante en la maduración temprana y el éxito de las fresas cultivadas bajo protección (Galati et al., 2020). Galati et al. (2020) se propuso recopilar información sobre el reciclaje de plástico en el sector hortícola, con el objetivo de mejorar y optimizar la eficacia de los programas de reciclaje, promoviendo así la sostenibilidad ambiental del sector. Mediante entrevistas, se encontró que los agricultores más jóvenes de Marsala, que gestionan empresas más pequeñas y poseen un mayor nivel educativo, muestran un interés significativo en participar en programas de reciclaje de plástico. Estos hallazgos destacan que un productor bien informado y concienciado es clave para resolver el problema, mejorando la sostenibilidad ambiental y fomentando una economía circular. El proyecto CASA también se centró en la economía circular, reutilizando materiales como botellas de plástico y priorizando medios de producción mayoritariamente reciclables.



### ***Contribución del Proyecto CASA y su relación a los ODS***

Los sistemas de agricultura sostenible pueden implementarse en diversas escalas, incluida la agricultura urbana, que presenta un alto potencial para la producción de cultivos tanto ornamentales como alimentarios. Esta modalidad se aplicó en el proyecto CASA, el cual se fundamentó en 9 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. Sin embargo, en la práctica, se observó su relación y contribución con al menos 16 de los 17 ODS (Tabla 3), excluyendo el ODS 14, Vida Submarina, dado que no se cultivaron organismos acuáticos en esta ocasión. Se analizó (Tabla 3) la contribución del proyecto CASA a los ODS, relacionándolo con las necesidades, motivaciones y proyecciones futuras que las mujeres miembros del comité identificaron (Tabla 1).










Tabla 3. Proyecto CASA en su contribución de los ODS relacionado a las necesidades, motivaciones y proyecciones en la colonia “El Veladero”.

ODS	Necesidades, motivaciones y proyecciones en la colonia	Proyecto CASA
	<p>Huertos urbanos, inseguridad alimentaria, ventajas económicas, adquisición de conocimientos</p>	<p>Esta tecnología, ofrece una oportunidad de emprendimiento sostenible, al posibilitar la generación de ingresos mediante la venta de productos ornamentales y alimenticios. Además, estos cultivos permiten el autoconsumo, lo que refuerza la autosuficiencia alimentaria y contribuye a la economía circular, al reducir la dependencia de cadenas de suministro externas.</p>
	<p>Información nutricional, huertos urbanos, inseguridad alimentaria</p>	<p>Oportunidad de producir alimentos saludables y asequibles, lo que representa una estrategia clave para fortalecer la seguridad alimentaria y fomentar la resiliencia en áreas vulnerables. Estos cultivos, se diseñaron para ser libres de pesticidas y otros químicos, lo que reduce riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Además, la participación en actividades de cultivo y jardinería ha demostrado tener efectos positivos en el bienestar físico y mental, promoviendo estilos de vida más saludables y una mayor conexión con el entorno natural.</p>
	<p>Información nutricional, adquisición de conocimientos, emprendimiento, huertos urbanos</p>	<p>Es una propuesta para el acceso a una alimentación saludable y nutritiva, promoviendo simultáneamente la participación activa de las mujeres en el sector agrícola. Además, incrementa la productividad y fomenta la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.</p>

Continuación...

	<p>Información nutricional, razones medioambientales, adquisición de conocimientos</p>	<p>Actúa como una herramienta educativa que fomenta el aprendizaje sobre sostenibilidad y nutrición, al mismo tiempo que sensibiliza sobre la importancia del cuidado del medio ambiente. Además, promueve la participación activa de las mujeres en la agricultura, contribuyendo a su empoderamiento económico y social.</p>
	<p>Cohesión social, emprendimiento</p>	<p>Ofrece oportunidades a las mujeres para involucrarse en la producción agrícola, desarrollar sus habilidades y generar ingresos. Asimismo, contribuye a la reducción de desigualdades sociales y económicas al facilitar el acceso a alimentos frescos y nutritivos en comunidades vulnerables, mejorando así la equidad y promoviendo la inclusión social.</p>
	<p>Razones medioambientales, reciclaje, orden y limpieza</p>	<p>Fomenta la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales, como el agua. La producción sostenible de los organismos cultivados se apoya en el uso responsable de los recursos naturales, lo que contribuye a la reducción del desperdicio y la generación de desechos a través de actividades de prevención, reducción, reciclaje y reutilización.</p>
	<p>Suministro de servicios, reciclaje, razones medio ambientales</p>	<p>Facilita que las comunidades con acceso limitado o nulo a la energía eléctrica puedan cultivar productos vegetales de manera sostenible. Este enfoque convierte a estos cultivos en un modelo de autosuficiencia y sostenibilidad, beneficiando tanto a la comunidad como al medio ambiente.</p>

Continuación...

 	<p>Emprendimiento, ventajas económicas, adquisición de conocimientos, razones medio ambientales</p>	<p>Representa una forma de empleo y emprendimiento que promueve el desarrollo económico sostenible. Además, impulsa la adquisición de habilidades en agricultura y gestión, lo que mejora la empleabilidad de las personas y les permite generar ingresos adicionales de manera innovadora. Esta propuesta busca desvincular el crecimiento económico de la degradación ambiental, garantizando al mismo tiempo la igualdad de oportunidades.</p>
  	<p>Reciclaje, zonas de recreación, razones medioambientales, orden y limpieza, beneficios a nivel individual, familiar y comunitario</p>	<p>Es una opción para facilitar el desarrollo de infraestructuras sostenibles y resilientes, promoviendo una urbanización inclusiva y sostenible, ya que se desempeñó como un espacio de interacción entre la comunidad y la naturaleza. Actuó como un lugar de recreación y reciclaje. Fomenta vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre los participantes.</p>
 	<p>Reciclaje, zonas de recreación, razones medioambientales</p>	<p>Actuó como un mecanismo para fortalecer la capacidad de planificación y gestión efectiva frente al cambio climático. Se fomenta la participación activa de las mujeres en estos procesos, contribuyendo a la lucha contra la desertificación, la rehabilitación de tierras, y la conservación, restauración y uso sostenible de los espacios verdes.</p>
 	<p>Beneficios a nivel individual, familiar y comunitario, cohesión social, zonas de recreación</p>	<p>Se garantizó que las decisiones relacionadas con el diseño de esta tecnología ecológica y el proceso de trabajo fueran inclusivas, participativas y representativas, asegurando que atendieran a las necesidades específicas de la comunidad y, en particular, de las mujeres. Este enfoque promueve la transparencia y la equidad, alineándose al fortalecimiento de la participación comunitaria y garantizar que las voces de los grupos vulnerables estén adecuadamente representadas en la toma de decisiones</p>

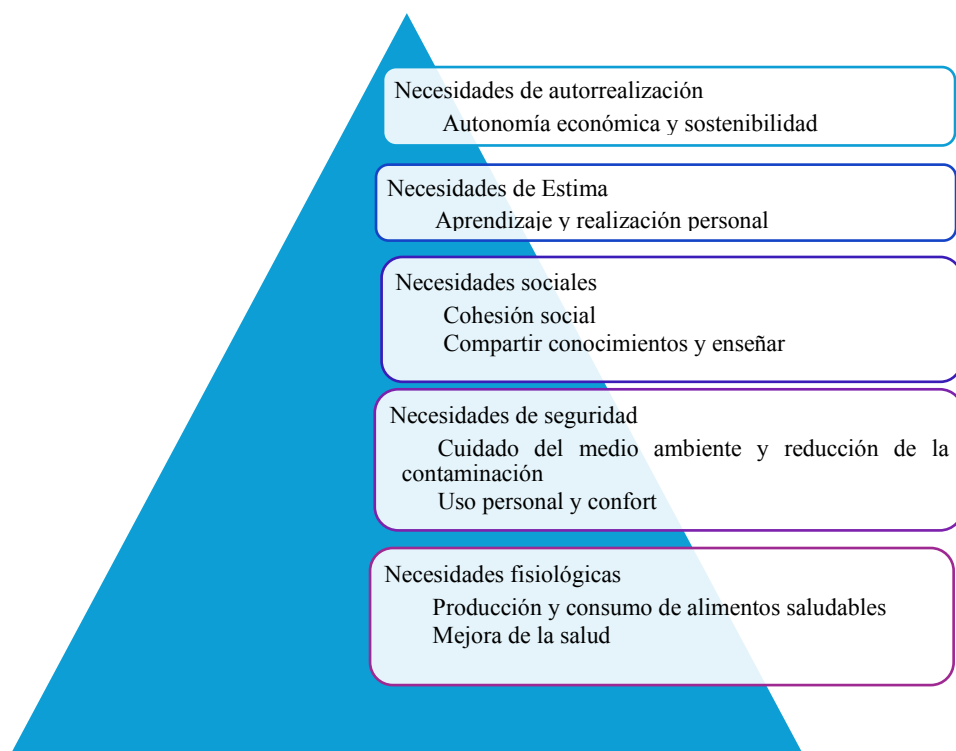
### ***Involucramiento y necesidades***

Los resultados de esta investigación proporcionan una valiosa visión sobre el nivel de involucramiento y aceptación de las personas en proyectos de este tipo. Asimismo, se obtuvo una imagen clara de las necesidades, actitudes, opiniones, percepciones y motivaciones, desde lo que las rodea hasta lo enfocado en el proyecto CASA. Con ayuda de la pirámide de Maslow (Fig. 8) Se agrupan en jerarquía diferentes necesidades que el proyecto CASA ayuda a cubrir. Este enfoque sistémico para comprender este fenómeno social desde su estructura y comportamiento en este proyecto con base en sus necesidades (Janker et al 2019).

La base, constituida con por las necesidades fisiológicas se ven relacionadas con la producción de productos alimenticios (Rich et al., 2018; Caputo et al., 2020), ofreciendo que esta forma de agricultura urbana las provea de seguridad alimentaria permitiendo una mejora en la salud (Kirby et al., 2021; Bennedetti et al., 2023).

En la dimensión de seguridad, la sensación de protección en un entorno físico y ambiental seguro está intrínsecamente ligada al cuidado del medio ambiente y la reducción de la contaminación (Grard et al., 2018; Langemeyer et al., 2021). El cultivo hidropónico no solo satisface la necesidad de producir alimentos de manera eficiente, sino que también contribuye a crear un entorno más limpio y saludable, promoviendo así la seguridad y el bienestar de las comunidades (Caputo et al., 2020; Gumisiriza et al., 2022; Hamilton et al., 2023 b).

En todo el desarrollo del proyecto CASA se observó la interacción social, el trabajo en equipo y el fortalecimiento de lazos entre las participantes. Funcionó como una plataforma para que las personas se unan con un propósito común, generando un sentido de pertenencia. Asimismo, se reforzó el sentido de pertenencia y apoyo mutuo, esenciales para el empoderamiento femenino, porque crea una red de apoyo y solidaridad que fortalece tanto a las mujeres como a sus familias (Alkire et al., 2013; Reynolds, 2015). Y la transmisión de conocimientos no solo mejora las habilidades y la confianza de las mujeres, sino que también fomenta un ambiente de aprendizaje continuo y colaboración dentro de la comunidad. Además, estas actividades promueven la participación activa y el liderazgo de las mujeres, dándoles la oportunidad de influir en decisiones que afectan su entorno y bienestar, lo que es crucial para lograr una verdadera igualdad de género y sostenibilidad a largo plazo (Reynolds, 2015; Akter et al., 2017).



**Figura 8. Pirámide de Maslow**

Las participantes demostraron una actitud siempre positiva a lo largo del aprendizaje, lo que se reflejó en su realización personal (Wright & Annes, 2016). Su manera de expresar cómo se sintieron en este proyecto es una clara muestra de ello. El hecho de sentirse satisfecha y contenta por cuidar su propio huerto contribuye al desarrollo de una autoestima positiva (Arroyo et al., 2019; Kirby et al., 2021). Sentirse interesada y emocionada al compartir la experiencia del huerto con otras personas, como familiares o la comunidad, puede elevar la sensación de respeto y aprecio por parte de los demás. El huerto proporciona una fuente de tranquilidad y relajación, lo que contribuye a un bienestar emocional que alimenta la satisfacción personal y el reconocimiento interno de estar haciendo algo valioso (Trendov, 2018; Kirby et al., 2021; Ilieva et al., 2022). Asimismo, se sentían seguras, felices y relajadas con un huerto hidropónico refuerza la percepción de autoeficacia, un aspecto esencial para el empoderamiento femenino (Wright & Annes, 2016; Trendov, 2018; Carvalho & Bógus, 2020).

Las participantes experimentaron una profunda satisfacción al ver cómo sus huertos tienen el potencial para contribuir en su autonomía económica y de manera sostenible. La autorrealización se evidenció en su capacidad para elaborar y diseñar sus huertos hidropónicos, les permitió alcanzar

un sentido más profundo de propósito y logro personal mientras que también les abrió la posibilidad de generar ingresos adicionales.

## **Conclusiones**

Este estudio resalta el papel fundamental de la agricultura urbana en el fortalecimiento y empoderamiento de las mujeres. A través de la implementación de sistemas de hidroponía utilizando el método Kratky, se logró reciclar materiales y demostrar la aceptación positiva de estos proyectos, ofreciendo un punto de partida tanto para nivel local como regional, especialmente en contextos de escasez de agua. El proyecto CASA combina las necesidades individuales y grupales con un enfoque sostenible aplicable a nivel global, en un escenario donde el aumento de la población y la escasez de recursos son realidades ineludibles. El enfoque de la IAP permitió darle voz a cada una de las participantes. El siguiente paso para ampliar el impacto de este marco es involucrar a actores clave, lo que permitirá aumentar el número de beneficiarios, dar mayor visibilidad a la comunidad y fortalecer la conciencia ambiental. Este proyecto tiene potencial de replicabilidad en contextos similares.

Aunque el proyecto CASA ofrece beneficios importantes en términos de seguridad alimentaria, fortalecimiento femenino y cohesión comunitaria, es fundamental considerar que no debe ser visto como una solución única para los desafíos estructurales que enfrentan las mujeres y las comunidades. Si bien estas iniciativas permiten mejorar el bienestar a nivel local, es importante reconocer que no deberían asumir en solitario la responsabilidad de resolver problemas más profundos como la pobreza, la desigualdad de género o la falta de acceso a servicios básicos. Para que el impacto sea más sostenible y equitativo, estas iniciativas deben integrarse con otras políticas públicas que aborden de manera estructural necesidades económicas, de salud, educación y vivienda. Es crucial que las autoridades locales, gobiernos e instituciones ofrezcan apoyo adicional a través de programas que complementen proyectos como CASA. De esta manera, no solo se alivia la carga sobre las mujeres y las comunidades, sino que también se asegura que los avances logrados a través de la agricultura urbana y el empoderamiento colectivo puedan ampliarse a largo plazo comunidad.

## Bibliografía

- Agarwal, B. (2014). Food security, productivity, and gender inequality. *PLoS ONE*, 9(8), e104444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104444>
- Aguirre, Mietz, L. K., Civit, B. M., & Arena, A. P. (2024). Life cycle assessment to evaluate the sustainability of urban agriculture: opportunities and challenges. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48(7), 983-1007.
- Akter, S., Rutsaert, P., Luis, J., Htwe, N. M., San, S. S., Raharjo, B., & Pustika, A. (2017). Women's empowerment and gender equity in agriculture: A different perspective from Southeast Asia. *Food policy*, 69, 270-279.
- Alkire, S., Meinzen-Dick, R., Peterman, A., Quisumbing, A., Seymour, G., & Vaz, A. (2013). The women's empowerment in agriculture index. *World development*, 52, 71-91.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology: Challenges and opportunities for farming in the Anthropocene. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura*, 47(3), 204-215.
- Anderson, C. L., Reynolds, T. W., Biscaye, P., Patwardhan, V., & Schmidt, C. (2021). Economic benefits of empowering women in agriculture: Assumptions and evidence. *The Journal of Development Studies*, 57(2), 193-208.
- Battersby, J., & Marshak, M. (2013). Growing communities: Integrating the social and economic benefits of urban agriculture in Cape Town. In *Urban Forum*. 24, 447-461. Springer Netherlands.
- Bautista-Olivas, A. L., Mendoza-Cariño, M., Chávez, C. R. Á., & Mexia, Á. C. S. (2024). Huella hídrica de la producción de lechuga en sistemas acuapónico e hidropónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(3), e3304-e3304.
- Benedetti, L. V., de Almeida Sinisgalli, P. A., Ferreira, M. L., & Lemes de Oliveira, F. (2023). Challenges to promote sustainability in urban agriculture models: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2110.
- Bernstein, S. (2011). *Aquaponic Gardening: A Step-by-Step Guide to Raising Vegetables and Fish Together*. New Society Publishers.
- Beus, C. E., & Dunlap, R. E. (1990). Conventional versus alternative agriculture: The paradigmatic roots of the debate. *Rural sociology*, 55(4), 590-616.
- Braun, V. & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative research in psychology*, 3(2), 77-101.

- Bui, N. K., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. *Waste management*, 78, 79-93.
- Caputo, S., Rumble, H., & Schaefer, M. (2020). "I like to get my hands stuck in the soil": A pilot study in the acceptance of soil-less methods of cultivation in community gardens. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120585.
- Carvalho, L. M. D., & Bógus, C. M. (2020). Gender and social justice in urban agriculture: The network of agroecological and peripheral female urban farmers from São Paulo. *Social Sciences*, 9(8), 127.
- Chiavenato, I. (2009). Comportamiento organizacional: la dinámica del éxito en las organizaciones (México: Mc Graw Hill Interamericana Editores. 2da. Ed. México: McGraw-Hill.
- Colson-Fearon, B., & Versey, H. S. (2022). Urban agriculture as a means to food sovereignty? A case study of Baltimore city residents. *International journal of environmental research and public health*, 19(19), 12752.
- Comisión Nacional de Vivienda (Conavi). (2018). MODELO GEOESTADÍSTICO PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE CONTENCIÓN URBANA 2018. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/333659/Modelo\\_Geoestad\\_stico\\_Per\\_metros\\_de\\_Contenci\\_n\\_Urbana\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/333659/Modelo_Geoestad_stico_Per_metros_de_Contenci_n_Urbana_2018.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. Disponible en: [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO MANEADERO (0212), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Disponible en: [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/BajaCalifornia/DR\\_0212.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0212.pdf). Acceso el 05 de noviembre de 2024.
- Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Baja California (2022). PLAN ESTATAL DE DESARROLLO DE BAJA CALIFORNIA 2022-2027. <https://www.bajacalifornia.gob.mx/Documentos/coplade/PED%20BC%20Completo%20110522.pdf>
- Comité de Planeación para el Desarrollo Municipal de Ensenada (COPLADEM) (20 junio 2024). Principales localidades en 2020. Recuperado de:

<https://copladem.ensenada.gob.mx/datosens/docs/LocalidadesMasPobladasMunicipioEnsenada.pdf> (Acceso el 07 de julio de 2024)

- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2022). Grado de Rezago Social en las AGEB urbanas de las localidades de Baja California. [https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/GRS\\_AGEB\\_2020\\_mapas\\_entidades.aspx](https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/GRS_AGEB_2020_mapas_entidades.aspx)
- Cornish, F., Breton, N., Moreno-Tabarez, U., Delgado, J., Rua, M., de-Graft Aikins, A., & Hodgetts, D. (2023). Participatory action research. *Nature Reviews Methods Primers*, 3(1), 34.
- Cortés-Ruiz, A., & Azuz-Adeath, I. (2021). Estimating the future hydric needs of Baja California, Mexico. Assessment of scenarios to stop being a region with water scarcity. *Water Supply*, 21(6), 2760-2771.
- Crookston, B. T., West, J. H., Davis, S. F., Hall, P. C., Seymour, G., & Gray, B. L. (2021). Understanding female and male empowerment in Burkina Faso using the project-level Women's Empowerment in Agriculture Index (pro-WEAI): a longitudinal study. *BMC Women's Health*, 21(1), 230.
- Departamento de Desarrollo Comunitario (DDC). (20 de marzo de 2024). Reglas de Operación 2024 del Departamento de Desarrollo Comunitario en atencio al programa de Salud y Bienestar Comunitario. <https://www.difbc.gob.mx/Imagenes/articulos/NORMATIVO/2024/REGLAS%20DE%20OPERACION/ROP%20DEPARTAMENTO%20DE%20DESARROLLO%20COMUNITARIO%20EN%20ATENCION%20AL%20PROGRAMA%20DE%20SALUD%20Y%20BIENESTAR%20COMUNTARIO.pdf> (Acceso el 12 de agosto de 2024)
- Despommier, D. (2010). *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*. Thomas Dunne Books.
- Diehl, J.A., Kaur, H. (2021). Introduction: New Forms of Urban Agriculture Embedded in Urban Resources—Where Is the Evidence?. In: Diehl, J.A., Kaur, H. (eds) *New Forms of Urban Agriculture: An Urban Ecology Perspective*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3738-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3738-4_1)
- Dieleman, H. (2017). Urban agriculture in Mexico City; balancing between ecological, economic, social and symbolic value. *Journal of Cleaner Production*, 163, S156-S163.
- Elliot, T., Torres-Matallana, J. A., Goldstein, B., Almenar, J. B., Gómez-Baggethun, E., Proença, V., & Rugani, B. (2022). An expanded framing of ecosystem services is needed for a sustainable urban future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112418.

- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. (2023). The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc3017en>
- Figueroa, D., Galeana-Pizaña, J. M., Núñez, J. M., Gomez, C. A., Hernández-Castro, J. R., del Mar Sánchez-Ramírez, M., & Garduño, A. (2021). Assessing drivers and deterrents of deforestation in Mexico through a public policy tool. The adequacy of the index of economic pressure for deforestation. *Forest Policy and Economics*, 133, 102608.
- Food and Agriculture Association of the United Nations (FAO). (2008). Urban agriculture for sustainable poverty alleviation and food security. Disponible en: <http://goo.gl/e1xGNp>. Acceso el 05 de noviembre de 2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (07 June 2024). FAO Report: Global fisheries and aquaculture production reaches a new record high. Disponible en: <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-report-global-fisheries-and-aquaculture-production-reaches-a-new-record-high/en>. Acceso el 03 de julio de 2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). The State of Food and Agriculture 2010-2011: Women in Agriculture—Closing the Gender Gap for Development. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018 a). Our world is urbanizing Is food on your agenda? Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/db9c225e-11d7-4cb9-bb58-d1da41b3481f/content>. Acceso 04 de julio de 2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018 b). The gender gap in land rights. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4966d50c-233b-43a9-8fa7-8d43263dd082/content>. Acceso el 26 de septiembre de 2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). The status of women in agrifood systems – Overview. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc5060en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany. Disponible en: [www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf](http://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf). Acceso el 04 de julio de 2024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). The *status of women in agrifood systems*. Rome. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cc5343en>. Acceso el 04 de julio de 2024.

- Foteinis, S. & Chatzisyneon, E. (2016). Life cycle assessment of organic versus conventional agriculture. A case study of lettuce cultivation in Greece. *Journal of cleaner production*, 112, 2462-2471.
- Galati, A., Sabatino, L., Prinzivalli, C. S., D'Anna, F., & Scalenghe, R. (2020). Strawberry fields forever: That is, how many grams of plastics are used to grow a strawberry?. *Journal of Environmental Management*, 276, 111313.
- Garduño, E., Navarro, A., Ovalle, P., & Mata, C. (2011). Caracterización socioeconómica y cultural de las mujeres indígenas migrantes en los valles de Maneadero y San Quintín, Baja California, México. *Boletín de Antropología Universidad de Antioquia*, 25(42), 57-83.
- Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J., & Birkved, M. (2016). Urban versus conventional agriculture, taxonomy of resource profiles: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-19.
- Gomiero, T. (2018). Food quality assessment in organic vs. conventional agricultural produce: Findings and issues. *Applied Soil Ecology*, 123, 714-728.
- Grard, B. J. P., Chenu, C., Manouchehri, N., Houot, S., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2018). Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services. *Agronomy for sustainable development*, 38(1), 2.
- Gumisiriza, M. S., Kabirizi, J. M., Mugerwa, M., Ndakidemi, P. A., & Mbega, E. R. (2022). Can soilless farming feed urban East Africa? An assessment of the benefits and challenges of hydroponics in Uganda and Tanzania. *Environmental Challenges*, 6, 100413.
- Hamilton, A. N., Fraser, A. M., & Gibson, K. E. (2023 b). Barriers to implementing risk management practices in microgreens growing operations in the United States: Thematic analysis of interviews and survey data. *Food Control*, 152, 109836.
- Hamilton, A. N., Topalcengiz, Z., & Gibson, K. E. (2023 a). Growing safer greens: exploring food safety practices and challenges in indoor, soilless production through thematic analysis of leafy greens grower interviews. *Journal of Food Protection*, 86(11), 100163.
- Hernandez-Aguilera, J. N., Mauerman, M., Herrera, A., Vasilaky, K., Baethgen, W., Loboguerrero, A. M., ... & Osgood, D. (2020). Games and fieldwork in agriculture: A systematic review of the 21st century in economics and social science. *Games*, 11(4), 47.
- Hernández-Aguilera, J. N., Mauerman, M., Herrera, A., Vasilaky, K., Baethgen, W., Loboguerrero, A. M., ... & Osgood, D. (2020). Games and fieldwork in agriculture: A systematic review of the 21st century in economics and social science. *Games*, 11(4), 47.

- Hovorka, A. J. (2006). Urban agriculture: addressing practical and strategic gender needs. *Development in Practice*, 16(1), 51-61.
- Ilieva, R. T., Cohen, N., Israel, M., Specht, K., Fox-Kämper, R., Fargue-Lelièvre, A., ... & Blythe, C. (2022). The socio-cultural benefits of urban agriculture: a review of the literature. *Land*, 11(5), 622.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/cpv/2020/resultadosrapidos/default.html>. Acceso el 10 de julio de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2021). Panorama sociodemográfico de México. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825197711.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197711.pdf). Acceso el 10 de julio de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023 b). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2020 Baja California. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825198084.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198084.pdf). Acceso el 11 de julio de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2024). ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA INTERNACIONAL DE LA MUJER. Disponible en: [https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP\\_DiaIntMujer.pdf](https://en.www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_DiaIntMujer.pdf). Acceso el 10 de agosto de 2024.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (7 DE MARZO DE 2023 a). Estadísticas a propósito del día internacional de la mujer. Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP\\_8M2023.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP_8M2023.pdf). Acceso el 10 de julio de 2024.
- Jalaluddin, M. (2017). Use of plastic waste in civil constructions and innovative decorative material (eco-friendly). *MOJ Civil Engineering*, 3(5), 359-368.
- Janker, J., Mann, S., & Rist, S. (2019). Social sustainability in agriculture—A system-based framework. *Journal of rural studies*, 65, 32-42.
- Kirby, C. K., Specht, K., Fox-Kämper, R., Hawes, J. K., Cohen, N., Caputo, S., ... & Blythe, C. (2021). Differences in motivations and social impacts across urban agriculture types: Case studies in Europe and the US. *Landscape and Urban Planning*, 212, 104110.

- Langemeyer, J., Madrid-Lopez, C., Beltran, A. M., & Mendez, G. V. (2021). Urban agriculture—A necessary pathway towards urban resilience and global sustainability?. *Landscape and Urban Planning*, 210, 104055.
- Lázaro, E. (2023). Estimation of the willingness to pay in two aquifers in Baja California, Mexico. Estimación de la disponibilidad a pagar en dos acuíferos en Baja California, México. DOI: 10.24850/j-tyca-16-2-4
- Leal Filho, W., Barbir, J., Sima, M., Kalbus, A., Nagy, G. J., Paletta, A., ... & Bonoli, A. (2020). Reviewing the role of ecosystems services in the sustainability of the urban environment: A multi-country analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121338.
- Méndez, V. E., Bacon, C. M., & Cohen, R. (2013). Agroecology as a transdisciplinary, participatory, and action-oriented approach. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37(1), 3-18.
- Mietz, L. K., Civit, B. M., & Arena, A. P. (2024). Life cycle assessment to evaluate the sustainability of urban agriculture: opportunities and challenges. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48(7), 983-1007.
- Montejo Murillo, S., Sarmiento Franco, J. F., & Monforte Méndez, G. A. (2023). Sustentabilidad alimentaria y empoderamiento de mujeres en huertos de la zona periurbana de Mérida, Yucatán. *Región y sociedad*, 35.
- Muise, I., Adams, M., Côté, R., & Price, G. W. (2016). Attitudes to the recovery and recycling of agricultural plastics waste: A case study of Nova Scotia, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 137-145.
- Muñoz-Euán, N., Mendoza-Espinosa, L., & Correa-Reyes, J. G. (2024). The Use of Aquaponic Systems to Achieve the Sustainable Development Objectives of the 2030 Agenda: A Systematic Review. *Hydroponics: The Future of Sustainable Farming*, 123-147.
- Neef, A., & Neubert, D. (2011). Stakeholder participation in agricultural research projects: a conceptual framework for reflection and decision-making. *Agriculture and Human Values*, 28, 179-194.
- OECD/FAO (2024), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033*, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, Disponible en: <https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2021), "Women and SDG 2 – Promoting sustainable agriculture", in *Gender and the Environment: Building Evidence and Policies to Achieve the SDGs*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/35ec6754-en>.

- Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for sustainable development*, 33, 695-720.
- Paganini, N., & Stöber, S. (2021). From the researched to co-researchers: including excluded participants in community-led research on urban agriculture in Cape Town. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 27(4), 443-462.
- Pantanella, E. (2018). Aquaponics production, practices and opportunities. *Sustainable Aquaculture*. (ed) Springer, Cham. 191-248.
- Pérez, C., & Suárez, L. (2019). Hidroponía urbana y sostenibilidad: El caso de comunidades vulnerables en Latinoamérica. Editorial EcoAgro.
- Phillips, Lauren (20 october 2022). The food crisis and the impact on women and girls. Disponible en: <https://www.unwomen.org/sites/default/files/2022-10/Presentation%20to%20UNWomen%20Executive%20Board%20FAO%20Lauren%20Phillips.pdf>. Acceso el 04 de julio de 2024.
- Pollard, G., Ward, J. D., & Koth, B. (2017). Aquaponics in urban agriculture: social acceptance and urban food planning. *Horticulturae*, 3(2), 39.
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*, 16(4), 1690.
- Poulsen, M. N., McNab, P. R., Clayton, M. L., & Neff, R. A. (2015). A systematic review of urban agriculture and food security impacts in low-income countries. *Food Policy*, 55, 131-146.
- Rahdriawan, M., & Arriani, R. R. (2020, March). Motives and dynamic of community-based aquaponics for urban farming in Semarang. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 448, No. 1, p. 012096). IOP Publishing.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (7th ed.). CRC Press.
- Reynolds, K. (2015). Disparity despite diversity: social injustice in New York City's urban agriculture system. *Antipode* 47(1):240–259. <https://doi.org/10.1111/anti.12098>
- Rich, K. M., Rich, M., & Dizyee, K. (2018). Participatory systems approaches for urban and peri-urban agriculture planning: The role of system dynamics and spatial group model building. *Agricultural Systems*, 160, 110-123.

- Rosete Vergés, F. A., Pérez Damián, J. L., & Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones geográficas*, (67), 39-58.
- Scheromm, P. (2015). Motivations and practices of gardeners in urban collective gardens: The case of Montpellier. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(3), 735-742.
- Setälä, H., Bardgett, R. D., Birkhofer, K., Brady, M., Byrne, L., De Ruiter, P. C., ... & Van der Putten, W. H. (2014). Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services. *Urban Ecosystems*, 17, 239-253.
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PloS one*, 6(8), e23777.
- Skar, S. L. G., Pineda-Martos, R., Timpe, A., Pölling, B., Bohn, K., Kylvik, M., ... & Junge, R. (2020). Urban agriculture as a keystone contribution towards securing sustainable and healthy development for cities in the future. *Blue-Green Systems*, 2(1), 1-27.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A., 2022. Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. (ed) FAO.
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Heike, P. & Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agriculture and human values*, 31, 33-51.
- Sumberg, J., & Giller, K. E. (2022). What is ‘conventional’ agriculture?. *Global Food Security*, 32, 100617.
- Szekely, I., & Jijakli, M. H. (2022). Bioponics as a promising approach to sustainable agriculture: a review of the main methods for producing organic nutrient solution for hydroponics. *Water*, 14(23), 3975.
- Trendov, N. M. (2018). Comparative study on the motivations that drive urban community gardens in Central Eastern Europe. *Annals of Agrarian science*, 16(1), 85-89.
- Tyson, R. V., Hochmuth, G. J., Lamb, E. M., McAvoy, E. J., & Treadwell, D. D. (2001). Sustainable Hydroponic Vegetable Production in a Controlled Environment. University of Florida IFAS Extension.
- Uhl-Bien, M., Schermerhorn Jr, J. R., & Osborn, R. N. (2006). Organizational behavior (9th ed.). John Wiley & Sons.

United Nations (UN), 22 March 2021. El agua es la base de la vida, pero está fuera del alcance de 2000 millones de personas. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/03/1489832#:~:text=Imprimir%20Correo%20electr%C3%B3nico-,El%20agua%20es%20la%20base%20de%20la%20vida%2C%20pero%20est%C3%A1,de%202000%20millones%20de%20personas&text=El%20agua%20es%20un%20recurso,grande%20desaf%C3%ADos%20demogr%C3%A1ficos%20y%20clim%C3%A1ticos>. Acceso el 04 de julio de 2024.

United Nations (UN). (13 de abril de 2023). La desigualdad de género en alimentación y agricultura cuestan al mundo un billón de dólares. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2023/04/1520097#:~:text=en%20Sierra%20Leona-,La%20desigualdad%20de%20g%C3%A9nero%20en%20alimentaci%C3%B3n%20y%20agricultura,mundo%20un%20bill%C3%B3n%20de%20d%C3%B3lares&text=Aunque%20los%20sistemas%20agroalimentarios%20son,precarios%20y%20sueldos%20m%C3%A1s%20bajos>. Acceso el 11 de julio de 2024.

United Nations Environment Programme (UNEP) (21 March 2016). Half the World to Face Severe Water Stress by 2030 unless Water Use is "Decoupled" from Economic Growth, Says International Resource Panel. Disponible en: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/half-world-face-severe-water-stress-2030-unless-water-use-decoupled#:~:text=Under%20current%20trends%2C%20demand%20for,of%20%2440%20to%20%2445%20billion>. Acceso el 03 de julio de 2024.

Van Nieuwkoop, M., Van de Velde, P., Huyer, S. & Kennedy F., K. (08 march 2022). Gender-smart agriculture: The only way forward for women and climate. Disponible en: <https://blogs.worldbank.org/en/climatechange/gender-smart-agriculture-only-way-forward-women-and-climate>. Acceso el 26 de septiembre de 2024.

Vargas, X. (2011). *¿Cómo hacer investigación cualitativa? Una guía práctica para saber qué es la investigación en general y cómo hacerla, con énfasis en las etapas de la investigación cualitativa.* ETXETA, Jalisco, 138. Disponible en: <https://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/981/94805617-Xavier-Vargas-B-COMO-HACER-INVESTIGA.pdf>

Villanueva, H. M., & Villagomez, I. T. (2019). Mujeres empoderadas y emprendedoras sociales: análisis comparativo de tres empresas poblanas en México. *Realidad empresarial*, (8), 36-42.

- Wang, S., Bai, X., Zhang, X., Reis, S., Chen, D., Xu, J., & Gu, B. (2021). Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. *Nature Food*, 2(3), 183-191.
- Warren, E., Hawkesworth, S., & Knai, C. (2015). Investigating the association between urban agriculture and food security, dietary diversity, and nutritional status: A systematic literature review. *Food Policy*, 53, 54-66.
- Whittinghill, L., & Sarr, S. (2021). Practices and barriers to sustainable urban agriculture: a case study of Louisville, Kentucky. *Urban Science*, 5(4), 92.
- Winpenney, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernandez, F., & Torricelli, R. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? ISBN 978-92-5-306578-3
- World Bank (15 de marzo de 2024). Overview. Disponible: <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/overview>. Acceso 03 de julio de 2024.
- Wright, W., & Annes, A. (2016). Farm Women and the Empowerment Potential in Value-Added Agriculture. *Rural Sociology*, 81(4), 545–571. doi:10.1111/ruso.12105
- Yap, C. (2019). Self-organisation in urban community gardens: autogestion, motivations, and the role of communication. *Sustainability*, 11(9), 2659.
- Zimmermann, M., Fischer, M., 2020. Impact assessment of water and nutrient reuse in hydroponic systems using Bayesian Belief Networks. *J. Water Reuse Desalinat.* 10(4), 431-442. doi: 10.2166/wrd.2020.026.
- Zubicaray, G., Brito, M., Ramírez Reyes, L., García, N., y Macías, J. (2021). Las ciudades mexicanas: tendencias de expansión y sus impactos. Coalition for Urban transitions: London, UK, y Washington, DC. Disponible en: <https://urbantransitions.global/publications/>

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

La investigación realizada en esta tesis reafirma el papel estratégico de la agricultura urbana, especialmente a través de sistemas acuapónicos e hidropónicos, como soluciones integrales para abordar los desafíos socioecológicos contemporáneos. Estos sistemas emergentes no solo representan una alternativa tecnológica, sino que también contribuyen de manera significativa a múltiples dimensiones del desarrollo sostenible. Entre sus aportaciones destacan la promoción de la seguridad alimentaria, el uso eficiente de los recursos hídricos y el empoderamiento comunitario, con un énfasis especial en la participación activa y capacitación de las mujeres. La evidencia recopilada en los estudios respalda el potencial de estas prácticas para avanzar hacia el cumplimiento de los ODS.

Desde una perspectiva ambiental, los sistemas acuapónicos e hidropónicos se destacan como estrategias innovadoras para la conservación y gestión sostenible de los recursos hídricos. La reutilización de aguas residuales tratadas, bajo estrictos estándares técnicos, no solo optimiza el uso del agua, sino que también fortalece el enfoque de economía circular al convertir los residuos en recursos valiosos. En esta primera aproximación, la producción acuapónica se ha centrado en organismos ornamentales sin comprometer la salud humana. Esta propuesta no solo promueve la conservación del agua en zonas áridas y semiáridas, sino que también representa una solución de manejo de aguas residuales, apoyando principalmente a los ODS 6 – Agua limpia y saneamiento, ODS 11 – Ciudades y comunidades sostenibles, ODS 12 – Producción y consumo responsable, y ODS 13 – Acción por el clima.

El proyecto CASA, basado en la agricultura urbana, ha demostrado ser un enfoque efectivo para el empoderamiento de las mujeres y la mejora de la cohesión comunitaria. La participación de las mujeres en estos sistemas de producción ha favorecido el desarrollo de habilidades técnicas, la autosuficiencia y la resiliencia, fortaleciendo así la comunidad en su conjunto. La metodología de Investigación Acción Participativa (IAP) permitió no solo involucrar a las mujeres como beneficiarias sino también como agentes activas, promoviendo un enfoque inclusivo y sostenible.

Sin embargo, es fundamental reconocer las limitaciones de estos sistemas. No constituyen una solución única para problemas estructurales, como la pobreza o la desigualdad, sino que representan una herramienta que, para maximizar su potencial, requiere una implementación estratégica e integral. Esto implica una articulación sólida con políticas públicas, inversión en infraestructura

verde, capacitación continua y colaboración entre diversos actores sociales: gobiernos locales, instituciones académicas, organizaciones comunitarias y sector privado.

Este documento ofrece una guía fundamentada para las partes interesadas y los responsables de la formulación de políticas públicas, destacando estrategias para el aprovechamiento sostenible de fuentes alternativas de agua, como las aguas residuales tratadas. Además, aborda la implementación de proyectos sociales, específicamente aquellos enfocados en agricultura urbana, como una herramienta clave para promover la seguridad hídrica, el desarrollo comunitario y la sostenibilidad ambiental.

### **Recomendaciones generales:**

- La investigación futura deberá profundizar en modelos de escalabilidad, evaluación de impactos a largo plazo y desarrollo de estrategias adaptables a diversos contextos urbanos y periurbanos.
- Para maximizar los beneficios de la hidroponía y la acuaponía, se recomienda fomentar una colaboración activa entre gobiernos locales, instituciones académicas y comunidades. Esta alianza puede promover la implementación de infraestructura azul y verde en entornos urbanos, optimizando así su impacto positivo en términos sociales y ambientales.
- Es crucial intensificar la educación ambiental y la difusión de los beneficios de los sistemas sostenibles mediante programas comunitarios y actividades de divulgación científica. Esto fomentará la aceptación e interés de las comunidades urbanas y rurales, favoreciendo la incorporación de infraestructura verde y facilitando la interacción de las generaciones jóvenes con organismos vivos y prácticas sostenibles.
- La reutilización de aguas residuales tratadas representa una opción viable y eficiente para zonas con escasez de agua, especialmente en sistemas de hidroponía y acuaponía donde se puede realizar un tratamiento adicional. Se recomienda implementar biofiltros eficaces y monitorear parámetros.
- Esta primera aproximación de agricultura urbana en la zona a través del proyecto CASA sugiere que la capacitación en la calidad del agua, técnicas agrícolas, y otros temas relacionados, puede mejorar significativamente la calidad de vida de mujeres en comunidades vulnerables. Se recomienda replicar este modelo en otros contextos urbanos y periurbanos, involucrando a actores clave como ONG y centros comunitarios para ampliar la red de beneficiarios. Además,

asegurar el acceso a financiamiento y materiales es fundamental para sostener estas iniciativas y maximizar su impacto a largo plazo.

- Asimismo, se recomienda el reúso de agua residual doméstica, como el agua de trastes, lavandería, ducha, condensación de aires acondicionados y agua de cocción de alimentos, siendo una estrategia eficaz para la conservación de recursos hídricos en entornos urbanos.
- Las alianzas entre instituciones, gobiernos locales y organizaciones sociales pueden facilitar la expansión y réplica de proyectos exitosos como el proyecto CASA. Estas redes deben fomentar la capacitación continua, el intercambio de experiencias y la colaboración interdisciplinaria para promover un crecimiento sostenible y equitativo en la agricultura urbana.
- Se recomienda la elaboración de un manual diseñado para el público en general, con el propósito de traducir el lenguaje científico y técnico en un formato claro, práctico y accesible. Este manual debe emplear un lenguaje sencillo, acompañado de gráficos, diagramas y ejemplos que ilustren conceptos complejos de manera comprensible. Además, es fundamental que incluya casos prácticos adaptados a las condiciones locales y herramientas interactivas, como listas de verificación o actividades, que promuevan la apropiación del conocimiento. De este modo, se facilita la implementación de tecnologías sostenibles como la agricultura urbana, empoderando a las comunidades para liderar proyectos que mejoren su calidad de vida y fortalezcan la sostenibilidad ambiental.
- Para asegurar la sostenibilidad y cobertura de los proyectos de agricultura urbana, especialmente los basados en hidroponía y acuaponía, se recomienda vincularlos a políticas públicas de desarrollo urbano y agrícola. Esto permitiría abordar problemáticas estructurales de manera integral, contribuyendo al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) tanto a nivel local como nacional.
- Es fundamental que futuros estudios o implementaciones de sistemas acuapónicos e hidropónicos en áreas urbanas consideren los ODS como referencia para garantizar una contribución directa a la Agenda 2030. Esto promoverá una visión integral que aborde el bienestar social, ambiental y económico en el contexto urbano.
- Se recomienda realizar estudios específicos que midan el impacto de las iniciativas de agricultura urbana en las mujeres, enfocándose en aspectos clave como el aumento de sus ingresos, la distribución del tiempo entre actividades productivas y reproductivas, y la mejora en su calidad de vida. Además, es fundamental asegurar que las mujeres no solo sean beneficiarias de estas

iniciativas, sino que también ocupen roles de liderazgo en su implementación y monitoreo. Esto contribuirá a un enfoque más inclusivo, donde las mujeres puedan ejercer su autonomía económica y social, y desempeñar un papel activo en la toma de decisiones y en el impulso del desarrollo sostenible en sus comunidades urbanas.

- Es fundamental diseñar iniciativas de agricultura con un enfoque inclusivo que garantice la participación activa y equitativa de las mujeres. Esto incluye no solo capacitaciones técnicas, sino también talleres que fortalecen habilidades de liderazgo, negociación y toma de decisiones, permitiendo a las mujeres asumir roles clave en las comunidades. Además, incorpora mecanismos para evaluar y monitorear cómo estas iniciativas impactan las dinámicas de poder dentro de las comunidades asegura un avance hacia relaciones más equitativas y respetuosas.
- Para fortalecer la autonomía de las mujeres y transformar las relaciones de poder en las comunidades, es fundamental garantizar su acceso a financiamiento, insumos agrícolas y oportunidades de comercialización justa. En el contexto de la agricultura urbana, la formación de cooperativas lideradas por mujeres y redes de apoyo puede impulsar el emprendimiento agrícola femenino, promoviendo su independencia económica y su rol como agentes de cambio. Estas iniciativas deben abordar las desigualdades de poder existentes y superar las barreras que limitan la participación plena de las mujeres, favoreciendo una mayor cohesión social y el desarrollo sostenible de las comunidades.
- Se recomienda diseñar mecanismos de gobernanza en proyectos de agricultura urbana que garanticen una representación equitativa de todos los miembros de la comunidad, promoviendo una gestión más inclusiva y democrática. Estos mecanismos deben facilitar la participación activa de diversos grupos, en particular de mujeres y comunidades vulnerables, asegurando que las decisiones se tomen de manera colectiva y en beneficio de todos. Al fomentar la redistribución del poder, se contribuye no solo al fortalecimiento de la cohesión social, sino también al desarrollo sostenible de las comunidades urbanas, mejorando su resiliencia y autonomía frente a los desafíos socioambientales.