

Diseño de un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y rentable: Un enfoque en el desarrollo de los peces y de los cultivos hortícolas, con base en la experiencia de la Asociación Frutos del Campo en Popayán – Cauca

Denis Duván Betin Penagos



Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento
Popayán – Cauca
2026

Diseño de un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y rentable: Un enfoque en el desarrollo de los peces y de los cultivos hortícolas, con base en la experiencia de la Asociación Frutos del Campo en Popayán – Cauca

Dennis Duván Betin Penagos

Trabajo de Grado modalidad Investigación para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental y de Saneamiento

Director

César Fernández Morantes Ph.D.

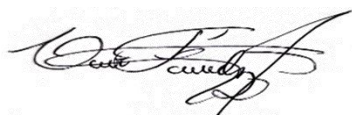


Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Programa de Ingeniería Ambiental y de Saneamiento
Popayán – Cauca

2026

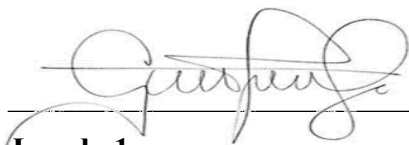
Nota de Aceptación

Una vez revisado y aprobado el documento final del trabajo de grado titulado *Diseño de un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y rentable: Un enfoque en el desarrollo de los peces y de los cultivos hortícolas, con base en la experiencia de la Asociación Frutos del Campo en Popayán – Cauca*, realizado por el estudiante Denis Duván Betin Penagos, se autoriza para optar el título de profesional de Ingeniería ambiental y saneamiento en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.



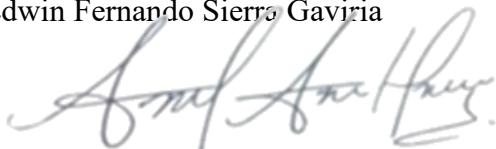
Director.

César Fernández Morantes



Jurado 1.

Edwin Fernando Sierra Gaviria



Jurado 2.

Arnol Arias Hoyos

Popayán, 2026

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo, en primer lugar, a mis padres, quienes han sido un ejemplo constante de fortaleza, compromiso y amor incondicional en mi vida. Gracias a su apoyo, dedicación y perseverancia, he aprendido que los sueños no son imposibles cuando se trabajan con disciplina, y que incluso en los momentos más difíciles siempre existe una razón para seguir adelante.

De manera muy especial, dedico este logro a mi madre, una mujer admirable que representa para mí la verdadera esencia de la resiliencia y la bondad. A través de sus enseñanzas, me ha inculcado valores fundamentales como la paciencia, el amor y la determinación, los cuales han sido clave en mi formación personal y académica. Su apoyo ha sido mi mayor fortaleza en los momentos de incertidumbre, y su ejemplo ha guiado cada uno de mis pasos.

Este logro no es solo mío, sino también suyo, pues refleja todo el esfuerzo, el amor y la entrega que has invertido en mi educación y en mi vida. Gracias, mamá, por ser mi inspiración constante, mi guía y mi refugio. Te amo profundamente, y esta tesis es una pequeña muestra de todo el agradecimiento que siento por ti.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por el don de la vida y por acompañarnos en cada paso de este camino, siendo nuestra guía, fortaleza y apoyo en los momentos de dificultad e incertidumbre. Expreso también nuestro más sincero agradecimiento a mi experimentado e inteligente tutor César Fernández Morantes, por su invaluable acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Gracias por su paciencia, dedicación, orientación y motivación constante, así como por compartir sus conocimientos, los cuales fueron fundamentales para hacer posible este proceso. Ha sido un verdadero privilegio contar con su guía.

De manera muy especial, extendo mi gratitud a mi madre, quien han sido el pilar fundamental en mi vida. Su amor incondicional, su esfuerzo constante y su sacrificio han hecho posible que hoy alcance esta meta. Gracias por apoyarme en cada etapa, por creer en mí incluso cuando el camino parecía difícil, y por enseñarme, con su ejemplo, el valor de la perseverancia, la responsabilidad y la dedicación.

Con profundo cariño, reconozco que cada uno de mis logros le pertenece. Sin su respaldo, paciencia y confianza, este objetivo no habría sido posible. Me ha brindado el regalo más valioso: la oportunidad de soñar y trabajar por mis sueños.

Madre, esta tesis es un reflejo de todo tu amor, esfuerzo y enseñanza. Espero que este logro les llene de orgullo, así como me siento orgulloso de ser su hijo. Les dedico este trabajo con toda nuestra admiración, amor y gratitud, llevando siempre en nuestro corazón los valores y enseñanzas que nos han transmitido.

Tabla de Contenido

Resumen.....	10
Abstract.....	12
Introducción	13
Capítulo 1: Problema de Investigación	17
1.1. Planteamiento del Problema.....	17
1.2. Justificación.....	18
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo General	19
1.3.2. Objetivos Específicos.....	19
Capítulo 2: Estado del Arte	20
2.1. Antecedentes	20
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	20
2.1.2. Antecedentes Nacionales	21
2.1.3. Marco Legal	23
Capítulo 3: Metodología	25
3.1. FASE I: Monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del agua.....	25
3.1.1. Actividad 1. Reconocimiento del sistema.....	25
3.1.2. Actividad 2. Medición parámetros físico-químicos	25
3.1.3. Actividad 3. Análisis de datos.....	26
3.2. FASE II: Análisis del desarrollo de los peces y de los cultivos hortícolas	26
3.2.1. Actividad 1. Curva de crecimiento de los peces	26
3.2.2. Actividad 2. Seguimiento del desarrollo de los cultivos.....	27
3.2.3. Actividad 3 Sistematización.....	27
3.3. FASE III: Plantear un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y de bajo costo.	27
3.3.1. Actividad 1. Identificar la necesidad del sistema.....	27
3.3.2. Actividad 2. Análisis de mejoras.....	28
3.3.3. Actividad 3. Análisis de costo/beneficio.....	29
3.3.4. Actividad 4. Dimensionamiento y esquema del sistema acuapónico	30
Capítulo 4: Resultados y Discusión	33
4.1. Fase I. Monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del agua	33

4.1.1. Actividad 1. Reconocimiento del sistema.....	33
Ciclo Productivo	37
4.1.2. Actividad 2. Medición parámetros fisicoquímicos	43
4.2. Fase II Evaluación del desarrollo de peces y plantas.....	58
4.2.1. Actividad 1. Curva de crecimiento de los peces	58
4.2.2. Actividad 2. Seguimiento del desarrollo de los cultivos.....	60
4.3. FASE III: Plantear un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y de bajo costo.	65
4.3.1. Actividad 1. Identificar la necesidad del sistema.....	65
4.3.2. Actividad 3. Análisis de costo/beneficio.....	71
4.3.3. Actividad 4. Esquema del sistema acuapónico	77
4.3.4. pH estable.....	79
4.3.5. Tratamiento del agua de lluvia	80
4.4. Guía y manual del sistema acuapónico.	80
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	81
5.1. Conclusiones	81
5.2. Recomendaciones	83
Referencias.....	84

Lista de Tablas

Tabla 1. Criterios para selección de artículos.....	28
Tabla 2. Criterios e interpretación de cada color para el análisis de costo beneficio.....	29
Tabla 3. Cálculos para el porcentaje de retorno	30
Tabla 4. Formulas y cálculos para el dimensionamiento del sistema acuapónico.	31
Tabla 5. Rango de parámetros fisicoquímicos para el cultivo de trucha arcoíris.....	37
Tabla 6. Ciclo y etapa productiva de la trucha Arcoíris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>).....	37
Tabla 7. Parámetros ideales para la siembra de plantas en un sistema acuapónico	38
Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos y rangos permisibles para las BN	40
Tabla 9. Porcentaje de alimento para cada etapa productiva.	43
Tabla 10. Formato de evaluación para calidad y salud en plantas del sistema	60
Tabla 11. Prompt utilizado para cada uno de los problemas presentes en el sistema	65
Tabla 12. Matriz de resultados de las tecnologías para aireación.	68
Tabla 13. Resultados de las tecnologías para recirculación.	69
Tabla 14. Resultados para el diseño del sistema acuapónico unifamiliar.	71
Tabla 15. Relación costo beneficio para tecnología de aireación	72
Tabla 16. Relación costo-beneficio para tecnología de recirculación.....	73
Tabla 17. Relación costo beneficio sobre estructura del sistema acuapónico unifamiliar.	74
Tabla 18. Valor de la inversión.....	76
Tabla 19. Parámetros fisicoquímicos ideales y de tolerancia para la carpa común	77
Tabla 20. Dimensiones hidráulicas y agronómicas del sistema acuapónico unifamiliar.	78

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación del sistema Acuapónico Asociación frutos del Campo	33
Figura 2. Plano estructural del sistema acuapónico a gran escala de la Asociación frutos del campo	34
Figura 3. Variación de los valores del pH en el sistema acuapónico	44
Figura 4. Variación de NAT en el sistema acuapónico	45
Figura 5 . Variación de datos de conductividad en el sistema acuapónico.	47
.Figura 6. Variaciones de NO_2^- – en el sistema acuapónico	48
Figura 7. Variación del NO_3^- en el sistema acuapónico.....	49
Figura 8. Variación del OD en los tanques de crecimiento y engorde 1 y 2 en el sistema acuapónico.	51
Figura 9. Variación de datos de temperatura en los tanques de crecimiento y engorde 1 y 2 en el sistema acuapónico	52
Figura 10. Comportamiento de datos de OD en el sumidero.....	53
Figura 11. Variación de la temperatura en el sumidero.....	54
Figura 12. Comportamiento del OD en sifones en el sistema acuapónico	55
Figura 13. Comportamiento de temperatura en sifones en el sistema acuapónico	56
Figura 14. Curva de crecimiento para los peces en el sistema acuapónico.	59
Figura 15. Diseño del sistema acuapónico unifamiliar.	79

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo principal proponer el diseño de un sistema acuapónico unifamiliar eficiente, sostenible y de bajo costo, tomando como referencia el análisis de un sistema a gran escala implementado por la Asociación Frutos del Campo en Popayán, Cauca. La metodología adoptada fue de enfoque cuantitativo–descriptivo, estructurada en tres fases: el monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua, la evaluación del desarrollo de peces y cultivos hortícolas, y el planteamiento de un nuevo diseño adaptado a condiciones domésticas.

Los resultados evidenciaron que, si bien el sistema analizado presenta un funcionamiento general adecuado, existen fluctuaciones en variables críticas como pH, nitritos, nitratos, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto, lo que afecta la estabilidad del equilibrio biológico. Asimismo, se identificaron limitaciones relacionadas con el consumo energético, el mantenimiento y la eficiencia estructural del sistema para lo cual se realizó una revisión documental para detectar mejoras que se puedan implementar en el sistema unifamiliar. En cuanto al desempeño productivo, se observó que el crecimiento de los peces puede extenderse más de lo esperado y que los cultivos presentan buena adaptación, aunque susceptibles a plagas y deficiencias nutricionales puntuales. Con los resultados anteriores se plantea un sistema acuapónico unifamiliar optimizado que mejora el uso del espacio (1m^2), reduce costos operativos y mantiene condiciones adecuadas para la producción sostenible de alimentos, generando valores estimados de 22 kg de peces en el año y un valor aproximado entre 25 y 50 hortalizas dependiendo de cual se utilice. Para el aspecto hidráulico se obtuvo un tiempo de retención de aproximadamente 1h para que las bacterias puedan cumplir su función de conversión de amoníaco a nitratos, también es esencial ese tiempo para la absorción de nutrientes disueltos en el agua por las plantas, se obtuvo un caudal de diseño para el sistema de 880L/h y una columna de agua de 3,33 m con lo cual se puede escoger la bomba de agua para la circulación del agua. Todo lo anterior fundamenta a que el diseño del sistema acuapónico sea de forma vertical. Constituyéndose como una alternativa eficiente y de bajo costo para fortalecer la seguridad alimentaria a nivel doméstico, debido a que pueden instalarse en espacios limitados, son de fácil manejo y requieren un bajo consumo de energía eléctrica. Además, permiten la producción sostenible de alimentos, favoreciendo el acceso a productos frescos y de calidad para el autoconsumo.

Palabras clave: acuaponía, sostenibilidad, seguridad alimentaria, sistemas productivos, calidad del agua.

Abstract

The primary objective of this study was to propose the design of an efficient, sustainable, and low-cost single-family aquaponic system, based on the analysis of a large-scale system implemented by the *Frutos del Campo* Association in Popayán, Cauca. A quantitative-descriptive methodology was adopted, structured in three phases: monitoring physicochemical water parameters, evaluating fish and crop development, and formulating a new design adapted to domestic conditions.

The results showed that, although the analyzed system functioned adequately overall, there were fluctuations in critical variables—such as pH, nitrites, nitrates, conductivity, temperature, and dissolved oxygen—which affected the stability of the biological balance. Limitations regarding energy consumption, maintenance, and structural efficiency were also identified; a literature review was conducted to pinpoint improvements that could be implemented in the single-family system. Regarding production performance, it was observed that fish growth periods could be longer than expected and that crops adapted well, although they remained susceptible to pests and specific nutritional deficiencies. Based on these results, an optimized single-family aquaponic system is proposed; it improves space utilization (1 m²), reduces operating costs, and maintains suitable conditions for sustainable food production, yielding an estimated 22 kg of fish per year and approximately 25 to 50 vegetable plants, depending on the crop variety. Hydraulically, a retention time of approximately one hour was determined to be necessary for bacteria to convert ammonia into nitrates and for plants to absorb dissolved nutrients; a design flow rate of 880 L/h and a 3.33 m water column were calculated, enabling the selection of an appropriate water circulation pump. These factors support the decision to adopt a vertical design for the aquaponic system. They represent an efficient, low-cost alternative for strengthening household food security, as they can be installed in limited spaces, are easy to operate, and require minimal electricity. Furthermore, they enable sustainable food production, facilitating access to fresh, high-quality produce for self-consumption.

Keywords: aquaponics, sustainability, food security, production systems, water quality.

Introducción

El crecimiento desmesurado de la población global es un factor determinante en la transformación de los ecosistemas y en la intensificación de la crisis climática. La expansión de las actividades humanas —sean productivas, recreativas o de ocupación territorial— ha generado un impacto directo sobre recursos esenciales como el suelo y el agua, alterando sus dinámicas naturales y reduciendo su capacidad de sostener tanto la vida silvestre como la producción agrícola. Este panorama se vuelve aún más complejo si se considera que muchas de las estrategias de mitigación actuales podrían resultar insuficientes hacia mediados del siglo XXI, debido a la interacción acelerada entre el crecimiento demográfico y el cambio climático [1].

En consecuencia, la seguridad alimentaria enfrenta un desafío crítico: mientras la demanda de alimentos crece de manera proporcional al aumento poblacional, las condiciones climáticas adversas limitan la productividad agrícola, dificultando la siembra y la cosecha en escenarios óptimos. Esta situación amenaza con dejar a sectores significativos de la población sin acceso a los alimentos necesarios para su subsistencia diaria, lo que repercute directamente en la salud y en la estabilidad social [2].

A nivel global, la problemática ha dejado de ser percibida únicamente como un asunto ambiental y se ha consolidado como un tema de gran relevancia socioeconómica y política. Los impactos derivados del cambio climático y de la presión sobre los recursos naturales ya no se discuten en términos de creencias, sino como realidades respaldadas por evidencia científica. Por ello, la presente década se perfila como un periodo decisivo para la descripción de estrategias que garanticen la producción y la sostenibilidad de los sistemas y, con ello, la salud alimentaria para las generaciones futuras [3].

En el ámbito mundial la diversidad y riqueza de recursos naturales han permitido que distintas poblaciones se asientan o se consolidan como participantes estratégicos y principales en la producción de alimentos agrícolas [4]. La presencia de ecosistemas variados, suelos fértiles y la variabilidad climática han favorecido el desarrollo de actividades agrícolas en una magnitud tan grande que se les permite abastecer necesidades internas como para las necesidades de mercados internacionales [5]. Los usos convencionales de los recursos naturales para actividades de producción agrícola se han ejecutado desde que el ser humano entendió como es todo el proceso de siembra y cosecha de alimentos vegetales, sin embargo, la incorporación de tecnologías innovadoras en producción sostenible se ha venido afianzando con el pasar del tiempo ya que trae

ventajas tanto ambientales, económicas y de salud alimentaria [6]. Simultáneamente existe una preocupación global por el cambio climático, hay muchos impactos negativos que genera este tema pero hay uno en especial y preocupa a los productores agrícolas y es la afectación que puede tener sobre los suelos siendo este el medio por el cual se lleva a cabo toda esta actividad de producción estimando que se pueden reducir la cantidad generada de alimentos para la demanda alimenticia de la creciente población [7].

Debido a los cambios que está experimentando el medio ambiente como consecuencia del cambio climático, es necesario implementar acciones que contribuyan a reducir sus impactos y a mejorar los ecosistemas utilizados en diferentes actividades antrópicas [8]. Una de estas acciones es la adopción de nuevas tecnologías para el cultivo de vegetales, las cuales permiten optimizar el uso de recursos como el agua y el suelo, además de reducir el uso de sustancias químicas y la emisión de contaminantes. Sin embargo, para que estas alternativas sean viables, es fundamental que, además de aportar beneficios ambientales, sean económicamente rentables y sostenibles en el tiempo [9].

Debido a los cambios bruscos que sufre el medio ambiente generados por el cambio climático, se necesita que se realicen acciones conjuntas para la reducción del impacto y mejoramiento de los distintos ecosistemas que se utilizan para distintas actividades [8]. Esto comienza por el uso de nuevas tecnologías para el cultivo de vegetales con objetivo en sostenibilidad, que en su mayoría no generan ningún impacto negativo hacia el medio ambiente, para así reducir el uso excesivo del agua y suelo, utilización de sustancias químicas para disminuir emisiones tóxicas tanto al suelo como al aire, todo lo anterior se debe plantear con énfasis en rentabilidad ya que para estas propuestas predomina el factor económico, lo que se busca es que sea rentable para su realización [9].

Colombia un país lleno de variabilidad climática donde se presentan las temperaturas más bajas en sus cordilleras y las temperaturas más altas sobre sus costas en la región pacíficas atlánticas y caribes, sin olvidarnos de las zonas llanas de la Orinoquia y parte de la amazonia, también posee muchas clases de fauna y flora, ha sido por largo tiempo uno de los países que exporta muchas variedades de alimentos a otros países [10]. Posee una problemática frente al cambio climático ya que se ha perjudicado varios aspectos que son fundamentales para el ciclo normal de un ecosistema como lo es la temperatura, el incremento y reducción de esta ha generado

varios periodos extensos de sequía y también inundaciones en todo el país afectando actividades diarias antrópicas [11].

En especial la agricultura ha sido afectada ya que no hay normalidad en los periodos de sequía y lluvias por lo cual ya no se obtiene información concreta sobre las predicciones meteorológicas lo cual afecta la siembra y cosecha en el sector agrícola dando así una problemática para la producción de alimento [12]. Es así cómo se fomenta la utilización de nuevas tecnologías o alternativas para la agricultura dejando atrás las técnicas que se venían utilizando generación por generación de agricultores, pero esto trae consigo un problema y es la viabilidad económica que estas nuevas ideas puedan aportar [13]. La acuaponía es una estrategia innovadora y sostenible que integra dos tipos de producción de alimentos, la acuicultura y la hidroponía; sistema que presenta una eficiencia productiva con cuidado al medio ambiente. Presenta ventajas con énfasis en sostenibilidad y acceso de alimentos, que la convierten en una opción prometedora para variar la obtención de alimentos y enfrentar la crisis climática que presenta el planeta [14]. No obstante, sus desventajas muestran la necesidad de una inversión constante y capacitación para realizar esta actividad a gran escala que se puede poner a prueba para afrontar esta problemática alimenticia sin generar impactos al medio natural [7].

En el departamento del Cauca se están implementando este tipo de sistemas en varios municipios como estrategias para la seguridad alimentaria [15]. En el municipio de Popayán, en la vereda La Torre, la Asociación Frutos del Campo implementó un sistema a gran escala que genera alimentos para familias de dicha comunidad todo esto en un convenio con la Universidad de Sevilla (España) y la Asociación Acuacol (Colombia). A pesar de tener muchas ventajas en su implementación, este sistema presenta un alto consumo energético para el funcionamiento de bombas, sistemas que ejecutan la recirculación y uso de suplementos para que el agua esté en óptimas condiciones, lo que aumenta los costos de operatividad. Esto reduce la rentabilidad, especialmente si no se logra un equilibrio entre ingresos y gastos de sostenibilidad.

Con lo anterior el objetivo de este trabajo de investigación es proponer una alternativa sostenible de un sistema acuapónico unifamiliar, basado en la observación y análisis de un sistema similar tipo NFT y de lecho de substrato ubicado en la Asociación Frutos del Campo, en la vereda La Torre, Popayán–Cauca. Para lograr este objetivo, se comenzó con la recolección de datos mediante muestreo y la observación del sistema a gran escala, lo que permitió entender su funcionamiento en condiciones reales. Además, se consultaron distintas fuentes y bases de datos

científicas para contrastar la información obtenida e identificar oportunidades de mejora en el diseño del sistema.

Capítulo 1: Problema de Investigación

1.1. Planteamiento del Problema

La canasta familiar ha reducido la presencia de alimentos vegetales debido a la escasez mundial de alimentos que se presenta como resultado de una compleja interacción entre variables como lo son la contaminación de suelos por la mala gestión, el aumento de la tasa de población mundial y la mala disposición final de residuos, hasta el 2019 la población mundial era de 7,811,293,689 y se presentó un crecimiento entre el 30% y 50% hasta el 2025, lo cual aumenta la producción de residuos [16]. Por lo tanto, se ha evidenciado que las actividades convencionales para obtener alimentos se han visto afectada por efecto de la variabilidad climática extrema. Se proyecta una disminución en la producción de alimentos para el 2050, un 14% de manera global [16], un 24 % para América latina [17] y un 17% para Colombia si no se implementan medidas de adaptación sostenibles a los fenómenos climáticos que se presentan [18], mientras que la pobreza y la desigualdad limitan a las personas la disposición y asignación de estos recursos [1]. En el departamento del Cauca el poco acceso a los alimentos se presenta con un porcentaje de 15,8% general para toda el área de Popayán [19], producto de la poca innovación por parte de los productores agrícolas. Por lo anterior, es esencial efectuar acciones coordinadas a nivel nacional e internacional, que refuerzan la resiliencia agrícola y así como la infraestructura alimentaria e invertir en desarrollo e investigación para prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes [20]. Dado un caso en el municipio de Popayán, específicamente en la vereda la Torre, donde se está utilizando una alternativa sostenible para la producción de alimentos, gracias a un acuerdo entre la Asociación Frutos del Campo y la Universidad de Sevilla . Esta alternativa se basa en un sistema acuapónico a gran escala que produce peces y alimentos vegetales, todo en un ciclo repetitivo y beneficioso ya que los peces producen los nutrientes para las plantas por acción de bacterias las cuales transforman compuestos nitrogenados al ser absorbidas por los cultivos hortícolas se purifica o mantiene la calidad de agua óptima para el desarrollo de los peces [14]. Esta práctica no produce impacto para el medio ambiente ya que disminuye el consumo de agua, la siembra de las plantas se hace en sustratos diferentes a la tierra reduciendo el uso excesivo del suelo. Siendo este una de las alternativas sostenibles ambientales eficientes para reducir impactos y de alta eficiencia para producir alimentos [7]. Sin embargo, un sistema a gran escala como este, no cuenta con una fácil implementación de forma doméstica, ya que necesita de una extensa área para su

construcción, un consumo energético alto para mantener en funcionamiento bombas de circulación y aireación, un control exhaustivo y recurrente para evitar saturación de materia orgánica en los filtros. Su exigente diseño de infraestructura y altos costos de mantenimiento y operación provocan una reducción drástica en su viabilidad económica para hogares y productores pequeños de la región, convirtiendo una solución alimentaria en un pasivo financiero.

Por lo tanto, emerge la necesidad de escalar y optimizar esta tecnología con un enfoque práctico y accesible, el principal desafío técnico radica en el diseño de un sistema acuapónico unifamiliar que integre eficiencia y funcionalidad. Dicho sistema debe ser compacto, preferiblemente con configuración vertical, con el fin de maximizar el aprovechamiento del espacio disponible. Asimismo, es imprescindible que el diseño priorice la reducción de consumo energético y de costos, de tal manera que pueda ser implementado en entornos domésticos sin requerir inversiones elevadas. Paralelamente, el sistema debe abordar y mitigar las limitaciones operativas típicas de los modelos a gran escala, tales como el alto consumo de recursos y la complejidad en el manejo. Finalmente, el diseño debe garantizar condiciones óptimas para su correcto funcionamiento, asegurando la estabilidad fisicoquímica del agua y promoviendo simultáneamente el adecuado crecimiento y desarrollo tanto de los peces como de los cultivos vegetales.

1.2. Justificación

La acuaponía es una alternativa innovadora integra ya que une la acuicultura y la hidroponía en un sistema sostenible de producción de alimentos. Este modelo se basa en una relación simbiótica: los desechos de los peces son transformados por bacterias en nutrientes aprovechables por las plantas, mientras que éstas purifican el agua y permiten la continuidad del ciclo. Se trata de una práctica ecológica que promueve la reutilización de recursos, disminuye la generación de residuos y reduce el impacto ambiental al convertir materia orgánica en insumos para la producción alimentaria [22] .

Diversos estudios han demostrado que los sistemas acuapónicos reducen hasta en un 90% el consumo de agua respecto a métodos tradicionales, lo que los convierte en una estrategia altamente eficiente y responsable frente a la crisis hídrica global. Este aporte es especialmente relevante en territorios vulnerables y biodiversos como el Cauca, donde la prioridad es la gestión sostenible de los recursos [14] .

La implementación de sistemas acuapónicos familiares aporta a mejorar y optimizar la condición de vida de las comunidades. Favorece una dieta más nutritiva y equilibrada, disminuye la dependencia de mercados externos, genera oportunidades de ingresos mediante la comercialización de excedentes y reduce los gastos alimenticios [23]. De esta manera, la acuaponía se convierte en una estrategia de seguridad alimentaria y desarrollo económico local. Este trabajo contribuye a la sostenibilidad al vincular la innovación agroecológica con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 2 (Hambre cero) y el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento). También, se alinea con el Plan de Desarrollo del Cauca 2024–2027, en la línea de desarrollo económico sostenible y cuidado ambiental, ofreciendo un modelo replicable en otras comunidades con condiciones similares.

Uno de los desafíos significativos en la implementación de sistemas de acuaponía es la inversión inicial requerida para la infraestructura, que puede resultar costosa y limitar la adopción generalizada de este método de cultivo [24]. Se espera que los resultados obtenidos y su análisis en esta investigación no solo ayude a mejorar la seguridad alimentaria en la región, sino que también ofrezcan un modelo replicable en otras comunidades con desafíos similares.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Proponer una alternativa sostenible de un sistema acuapónico unifamiliar, basado en la observación y análisis de un sistema similar tipo NFT y de lecho de substrato ubicado en la Asociación Frutos del Campo, en la vereda La Torre, Popayán–Cauca

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un monitoreo continuo de parámetros fisicoquímicos del agua empleada en el sistema a gran escala.
- Analizar el progreso en el desarrollo de los peces y cultivos hortícolas del sistema acuapónico.
- Diseñar un sistema acuapónico unifamiliar que sea sostenible y de bajo costo.

Capítulo 2: Estado del Arte

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Para la realización de este trabajo se utilizaron como base referencial diferentes estudios y trabajos que tienen relación con el diseño, mejoramiento, funcionamiento y modificación de sistemas acuapónicos unifamiliares y a gran escala con el fin de obtener información que ayudó a cumplir con el objetivo de la investigación.

En un primer trabajo se llevó a cabo una investigación sobre la Sostenibilidad económica de sistemas acuapónicos a pequeña escala para la autoproducción de alimentos en Institución de Educación Secundaria Joaquín Romero Murube en Sevilla, España [25]. En este estudio se evaluó, durante un año, la sostenibilidad económica de los sistemas acuapónicos a pequeña escala para la autoproducción de alimentos mediante la construcción y monitoreo de dos sistemas acuapónicos unifamiliares basándose en modelos ya estipulados en la FAO. Este trabajo se relaciona a esta investigación ya que da a entender que el diseño y la implementación de un sistema acuapónico a pequeña escala sale beneficioso para el consumo del hogar y no para emplearlos como un negocio por el costo elevado que genera la operación, consumo de energía y actualización del sistema por lo tanto no genera viabilidad en el mercado y se vuelve una práctica para el autoconsumo.

En el país de Alemania, se realizó un estudio sobre el uso de las azoteas urbanas para la obtención de alimentos mediante la acuaponía, es decir utilizar sistemas acuapónicos en las azoteas de hogares y edificios de Berlín, ciudad que cuenta con una gran expansión de infraestructura urbana con aproximadamente con 800 edificios y disponen con más de 2000 al aire libre. El trabajo titulado: “Usos de las azoteas urbanas: competencia y potencial desde la perspectiva de la agricultura y la acuaponía – Un estudio de caso de Berlín”, analiza e identifica la adaptación de los sistemas acuapónicos en una ciudad de elevada densidad poblacional. Los resultados mostraron una gran cobertura (888.7 hectáreas) de los cultivos en las azoteas en Berlín, con la posibilidad de cubrir más del 100% de las necesidades anuales de la ciudad con verduras cultivadas. Además, este estudio muestra la ventaja estructural o versatilidad del diseño de un sistema acuapónico unifamiliar, ya que se puede modificar (horizontal y vertical) para todo tipo de lugar en el que se

vaya a implementar así no tengan mucha disponibilidad de espacio o superficie para su construcción [26].

En otro trabajo realizado por investigadores de la Universidad de Malaya, en la ciudad de Kuala Lumpur, Malasia, implementaron un sistema acuapónico modular y compacto, para el uso y consumo urbano, incrementaron la eficiencia de la ejecución del sistema gracias a la separación de los componentes en módulos, lo que permite aislar cualquiera de estos y que el agua fluya por donde se deseaba, también se realizó la utilización de materiales reutilizables como tanques de PVC de agua potable que ya no eran empleados [27]. Como resultado se mejoró significativamente la tasa de crecimiento de los peces de un promedio de 12,2 cm a un valor de 15,3 cm . La metodología de este trabajo proporciona información para el diseño de un sistema acuapónico unifamiliar, impulsa el uso de programas de software de flujo de agua para ajustar o controlar el flujo de nutrientes y oxígeno en el agua beneficiando a un crecimiento constante y saludable en el peso de los peces y plantas gracias al ser expuestos a un sistema que mantiene constantemente valores de parámetros fisicoquímicos óptimos para su desarrollo.

En el Reino Unido, específicamente en la Universidad de Exeter, se desarrolló un sistema acuapónico unifamiliar incorporando nuevas tecnologías de monitoreo. El proyecto integró sensores y actuadores para controlar parámetros críticos como la calidad del agua y la oxigenación, además de una aplicación en línea (*Blynk*) que permitió gestionar dispositivos y datos en tiempo real. Los resultados mostraron mejoras sustanciales: el pH se mantuvo estable en 6,8, el amoníaco por debajo de 0,5 mg/L, y el crecimiento de peces aumentó a 0,4761 g/día frente al rango previo de 0,1–0,3 g/día. Asimismo, las plantas alcanzaron 19 cm en 29 días, superando el límite anterior de 10–15 cm. El sistema redujo costos operativos en 150 dólares y el consumo energético en un 30%, gracias al monitoreo digital y al uso de energía fotovoltaica. Este antecedente evidencia que la integración de tecnologías inteligentes en acuaponía no solo optimiza la producción de alimentos de calidad, sino que también disminuye significativamente los gastos de operación y energía, aportando un modelo replicable para la sostenibilidad urbana [28].

2.1.2. Antecedentes Nacionales

El trabajo con énfasis sobre el diseño de un sistema de producción acuapónico en la vereda Las Quinchas, Boyacá, bajo el enfoque de la nueva ruralidad, evidencia cómo la acuaponía puede convertirse en una alternativa sostenible y replicable para comunidades rurales que enfrentan

restricciones productivas derivadas de la declaratoria de áreas protegidas. Aborda directamente la problemática socioeconómica de poblaciones que perdieron sus medios tradicionales de subsistencia y recurrieron a prácticas ilegales como la deforestación o la minería. Este trabajo se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con políticas de educación ambiental. También señalan que en Colombia existen pocos sistemas acuapónicos implementados en zonas de amortiguamiento, destacan que la acuaponía reduce hasta en un 90% el consumo de agua frente a métodos convencionales y genera ingresos familiares mediante la comercialización de excedentes. Dentro de sus objetivos propone un modelo replicable que fortalece la seguridad alimentaria y el tejido social. La importancia del diseño radica en que no se limita a un prototipo técnico, sino que se transforma en una herramienta controlable de transformación comunitaria, capaz de mejorar la calidad de vida, fomentar conciencia ambiental y abrir oportunidades de desarrollo sostenible en territorios vulnerables como el Cauca y Boyacá [29].

El artículo que tiene por nombre: La acuaponía urbana: fomentando la agricultura sostenible en entornos urbanos, demuestra la pertinencia de aplicar sistemas acuapónicos verticales en contextos urbanos como respuesta a la inseguridad alimentaria que afecta al 30% de la población colombiana y hasta el 73% de la población migrante, cifras que reflejan una crisis estructural en el acceso a alimentos. Aborda directamente la problemática que se presenta en este trabajo es de las ciudades con limitaciones de espacio y recursos, se encamina en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y en la reducción de la huella de carbono. También señala que, aunque existen experiencias buenas internacionales con sistemas unifamiliares, en Colombia aún son escasos los sistemas acuapónicos urbanos tecnificados. Es importante resaltar y destacar que estos sistemas reducen hasta en un 78% el consumo de agua, eliminan fertilizantes químicos y acortan la cadena de suministro, garantizando alimentos frescos y locales. Los autores presentan el Sistema Acuapónico Modular (SAM) desarrollado por la Universidad Santo Tomás en Bucaramanga, instalado en un área menor a cinco metros cuadrados con capacidad para 500 L de peces y 100 cultivos vegetales, como un prototipo replicable que integra economía circular, aprovechamiento de residuos y energía solar. La importancia de este diseño radica en que no solo ofrece una solución técnica eficiente, sino que también prioriza la producción de alimentos al fomentar la participación comunitaria, la educación ambiental y la resiliencia social en comunidades urbanas vulnerables, convirtiéndose en un modelo transformador para enfrentar los desafíos de sostenibilidad y seguridad alimentaria en América Latina [30].

2.1.3. *Marco Legal*

Se tomaron en cuenta diferentes normas importantes para la elaboración de esta investigación las cuales tuvieron énfasis en los diferentes aspectos que conforman la acuaponía (hidroponía y acuicultura) en Colombia, en estas se muestra los criterios bajo los cuales se debe ejecutar el funcionamiento de un sistema acuapónico.

- **Resolución 2674 DE 2013.** Expresa los requisitos que se deben seguir para la producción y manejo de alimentos, esta resolución es fundamental para aseverar la seguridad e inocuidad de los alimentos consumidos en el país.
- **Resolución 20186 ICA.** Decreta las condiciones de bioseguridad y sanitarias que deben cumplir los establecimientos que realizan la producción de animales acuáticos, esta resolución busca proteger, prevenir y controlar enfermedades a las especies acuícolas que serán para consumo humano, la inocuidad alimentaria es el principal objetivo de esta normativa.
- **Ley 13 DE 1990 (Estatutos General de Pesca).** Aunque esta ley no menciona directamente a la acuaponía se relaciona con esta por la siembra de peces que se presenta (acuicultura), ya que muestra los requisitos que se debe tener en cuenta para el uso o consumo del agua y para el manejo sanitario de los peces, como también los tipos de permisos y licencias para la utilización de lo anteriormente mencionado.
- **Decreto 3930 DE 2010.** Esta reglamentación está direccionada a la regulación y vertimientos de uso agua, para la acuaponía es una ventaja ya que es una práctica de recirculación cerrada, si necesita de descargas de agua por lo cual este decreto se relaciona con ella ya que deben cumplir cierta calidad para su vertimiento a suelos o a cuerpos de agua.
- **Decreto 1071 de 2015.** El decreto 1071 de 2015 Recopila y organiza toda la normativa del sector agropecuario, incluyendo la acuicultura. Para los sistemas acuapónicos, este decreto orienta aspectos técnicos y administrativos relacionados con la producción de peces, como registros, control sanitario y condiciones de operación, facilitando el cumplimiento legal en este componente del sistema.
- **Decreto 4181 de 2011.** Creó la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP), entidad encargada de regular, controlar y promover las actividades acuícolas y pesqueras en Colombia. Su labor es fundamental para garantizar que la producción de peces se

realice de manera organizada, sostenible y en cumplimiento de los requisitos establecidos por la normatividad nacional

- **Resolución 30021 de 2017 ICA.** Establece los lineamientos de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). Su aplicación asegura que las hortalizas se produzcan bajo condiciones higiénicas y controladas, lo que mejora la calidad del producto y facilita su comercialización en mercados formales.

- **Decreto 1541 de 1978 Colombia.** Regula el uso y aprovechamiento del recurso hídrico. Este decreto es fundamental en acuaponía porque cuando el sistema requiere captar agua de fuentes naturales, ya que obliga a gestionar permisos y a garantizar un uso responsable del agua.

- **Resolución 2115 de 2007 de Colombia.** Define los criterios de calidad del agua para consumo humano. Sirve como referencia para asegurar que el agua utilizada no represente riesgos para la salud, especialmente cuando los productos cultivados están destinados al consumo.

- **Resolución 0631 de 2015 Colombia.** Establece los límites máximos de contaminantes en los vertimientos. Este regula la descarga de agua del sistema, evitando impactos negativos en el ambiente y promoviendo prácticas sostenibles.

- **Decreto 1076 de 2015 Colombia.** Este decreto orienta aspectos como permisos ambientales, uso de recursos naturales y manejo de residuos, garantizando que el sistema opere dentro de un marco de sostenibilidad.

- **Decreto 2078 de 2012.** Define las funciones del Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA), entidad responsable de velar por la calidad e inocuidad de los alimentos que consumen los colombianos.

- **Decreto 4765 de 2008.** Mediante este decreto se modifica la estructura del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), entidad adscrita al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. El ICA es la autoridad nacional responsable de la protección sanitaria y fitosanitaria del sector agropecuario, ejerciendo funciones de vigilancia, control, prevención y certificación en los sistemas de producción animal y vegetal. Estas competencias son relevantes para los sistemas acuapónicos, debido a que contribuyen a garantizar condiciones adecuadas de sanidad y producción sostenible.

Capítulo 3: Metodología

Para llevar a cabo la realización de esta investigación se estableció una metodología de enfoque cuantitativo y descriptivo, el primero porque se tomaron valores numéricos para medir todo lo relacionado con parámetros fisicoquímicos, desarrollo de peces y la cosecha de cultivos vegetales y animales. El enfoque cualitativo hace referencia a valores que se tomaron mediante observación haciendo referencia a datos como presencia de enfermedades para ambos cultivos, problemáticas del sistema y el desarrollo de los cultivos vegetales. Todo lo anterior para caracterizar y describir el comportamiento del sistema [31]. Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos estos se relacionaron con la metodología mediante las fases que se presentan a continuación.

3.1. FASE I: Monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del agua

3.1.1. *Actividad 1. Reconocimiento del sistema*

Principalmente se realizó un reconocimiento general en la Asociación Frutos del Campo, en la vereda La Claridad, con el objetivo de ubicar geográficamente y obtener información sobre las condiciones ambientales que puedan influir en el funcionamiento del sistema acuapónico (temperatura, humedad, pluviosidad, luz solar y humedad relativa). Para esto se utilizaron herramientas digitales en línea como Google earth y adquiriendo datos climatológicos proveniente de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio en la página del IDEAM.

Se analizó la estructura del sistema acuapónico mediante la observación para identificar qué partes o componentes lo conforman y la función de cada uno de ellos para el proceso de producción. También se establecieron puntos de muestreo para los parámetros fisicoquímicos,

Finalmente, con toda la recopilación de los datos anteriores se elaboró una descripción para así diseñar un croquis en AutoCAD que represente la distribución espacial de las partes que conforman el sistema.

3.1.2. *Actividad 2. Medición parámetros físico-químicos*

Se midieron parámetros fisicoquímicos relevantes para los sistemas acuapónicos en los puntos de muestreo identificados en la actividad anterior. Los parámetros *in situ* fueron el potencial hidrógeno (pH), el amoníaco (NH_3), los nitritos (NO_2^-), los nitratos (NO_3^-) y el oxígeno disuelto

(OD). Los cuatro primeros parámetros se determinaron usando kits multiparamétricos de la marca API, los cuales se basan la lectura mediante métodos de comparación visual mediante una escala estandarizada [32], mientras que el OD se midió con un medidor multiparamétrico portátil Hach HQ40D junto a una sonda óptica Intellical LDO. En tanto, la conductividad (parámetro *ex situ*) fue medido haciendo uso de un conductímetro de alta precisión marca Hanna (HI2315) [29]. Para esto, la muestra fue procesada en el laboratorio de Ciencias Ambientales de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, siguiendo el protocolo del IDEAM [33].

El seguimiento de los parámetros indicados se llevó a cabo de manera continua por 3 meses para la recolección de una cantidad de datos suficientes con el objetivo de generar resultados confiables y precisos.

3.1.3. Actividad 3. Análisis de datos

Después de recopilar los datos se realizó un análisis general para identificar tendencias y variaciones en los parámetros del agua a lo largo del tiempo en el funcionamiento del sistema en cada uno de los componentes mediante análisis descriptivo para entender cómo se comporta cada uno de los parámetros a lo largo del tiempo.

3.2. FASE II: Análisis del desarrollo de los peces y de los cultivos hortícolas

3.2.1. Actividad 1. Curva de crecimiento de los peces

Para estimar el aumento de biomasa se realizaron biometrías cada 30 días. Los peces fueron capturados con nasas de malla fina, siguiendo condiciones de asepsia recomendadas [34]. Cada individuo se pesó en una balanza digital (Dubai Kitchen) y fue devuelto al sistema en menos de 2 minutos para reducir el estrés térmico y mecánico.

La evaluación del componente acuícola se enfocó en el monitoreo del ciclo productivo de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Se efectuaron biometrías periódicas para evaluar la ganancia de peso y estimar el tiempo requerido para alcanzar el peso comercial (350 g).

3.2.1.1. Análisis del rendimiento acuícola.

Los datos biométricos recopilados durante el seguimiento de la especie cultivada fueron tabulados y analizado. A partir de esta información, se calcularon el incremento de la biomasa total

del tanque y el peso promedio alcanzado, lo que permitió estimar la duración del ciclo productivo hasta llegar al peso comercial óptimo.

3.2.2. *Actividad 2. Seguimiento del desarrollo de los cultivos*

Para evaluar el desarrollo de los cultivos hortícolas bajo la técnica de Película de Nutriente (NFT), se implementó un protocolo de monitoreo observacional durante 3 meses. La recolección de información se realizó mediante un formato periódico de evaluación de calidad y sanidad vegetal, que permitió registrar el estado fenológico y fitosanitario, incluyendo la condición de raíces, tallos y hojas, así como la detección temprana de deficiencias nutricionales y presencia de plagas foliares [35].

3.2.2.1. *Análisis fitosanitario y fenológico.*

La información cualitativa y cuantitativa obtenida mediante el formato de evaluación de calidad y sanidad vegetal fue procesada para determinar el nivel de adaptación de los cultivos hortícolas a la práctica de siembra en película de Nutriente (NFT). Se estimó la aparición de plagas foliares (como pulgones) y se clasificó la incidencia de alteraciones fenológicas, incluyendo deficiencias nutricionales, clorosis y afectaciones en el sistema radicular. En conjunto, estos resultados permitieron establecer un perfil integral del estado fitosanitario durante los tres meses de evaluación.

3.2.3. *Actividad 3 Sistematización*

La información fue organizada en hojas de cálculo, facilitando la elaboración de matrices de evaluación, tablas de alimentación por etapas y modelo de crecimiento productivo. Estos resultados constituyeron la base técnica para sustentar las decisiones de dimensionamiento y rediseño estructural en la Fase III.

3.3. FASE III: Plantear un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y de bajo costo.

3.3.1. *Actividad 1. Identificar la necesidad del sistema*

Con los resultados que se obtuvieron en la fase I y fase II se identificaron las necesidades del sistema desde los diferentes componentes en el agua, peces, bacterias, plantas e infraestructura, y condiciones eficientes para el funcionamiento.

3.3.2. Actividad 2. Análisis de mejoras

3.3.2.1. Búsqueda Bibliográfica Asistida.

Para abordar las problemáticas operativas identificadas en el sistema a gran escala, se realizó una revisión sistemática orientada a identificar soluciones aplicables a la escala unifamiliar. La revisión se apoyó en plataformas de inteligencia artificial (IA) académica (Consensus PRO), lo que permitió optimizar la extracción y síntesis de investigaciones primarias de alto impacto[36].

La búsqueda se estructuró mediante prompts (instrucción de entrada) alineados en los ejes críticos definidos en las fases previas para la optimización del diseño. Los prompts fueron formulados en inglés, con un lenguaje claro, específico y técnico, de forma tal que delimitaran el objeto de estudio y orientaran la búsqueda hacia resultados pertinentes, favoreciendo la recuperación de evidencia científica relevante. El interés investigativo de este trabajo se centra en la identificación de estudios de carácter experimental, de campo u observacional, por lo que resulta necesario excluir investigaciones de tipo secundario como revisiones bibliográficas.

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante la plataforma Consensus. En primer lugar, se definió una pregunta de investigación clara y delimitada, alineada con los objetivos del estudio, evitando planteamientos demasiado generales o ambiguos. Posteriormente, se establecieron criterios de búsqueda que se muestran en la tabla 1, relacionados con aspectos como el año de publicación, el número de citas y el acceso a los documentos, con el fin de garantizar la selección de información pertinente y actualizada. Con base en estos criterios, se ejecutó la búsqueda de artículos científicos, permitiendo organizar y filtrar los resultados de manera precisa. Como paso final, se analizaron los estudios identificados, utilizando las herramientas de síntesis de Consensus para priorizar las publicaciones más relevantes y de mayor impacto para el desarrollo de la investigación.

Tabla 1.

Criterios para selección de artículos.

Criterio	Descripción
Período	2021- 2026
Idioma	Inglés
Clasificación de la revista	Q1 y Q2

Citas	Mayor a 10
Acceso del documento	Acceso abierto
Tipo de artículo	Investigación experimental.

3.3.3. Actividad 3. Análisis de costo/beneficio

Para la selección de los componentes más adecuados y económicamente viables del sistema acuapónico unifamiliar, se ejecutó un análisis de costo-beneficio enfocado en la evaluación de los costos de capital o iniciales (CAPEX) y los costos operativos y de mantenimiento (OPEX). Este análisis se estructuró mediante una matriz multicriterio tipo semáforo, una herramienta de control que permite contrastar de forma objetiva el costo real de las alternativas tecnológicas frente al presupuesto base definido para el proyecto [14], [37]. La evaluación de cada tecnología se categorizó en tres niveles de cumplimiento, según su desviación porcentual respecto al presupuesto estimado, como se especifican en la tabla 2.

Tabla 2.

Criterios e interpretación de cada color para el análisis de costo beneficio

Puntaje	Interpretación	Semáforo	Ref.
4.0 – 5.0	Muy favorable	Verde	[38],[39]
3.0 – 3.9	Favorable	Verde	
2.0 – 2.9	Moderadamente favorable	Amarillo	
1.0 – 1.9	Poco favorable	Rojo	
< 1.0	No recomendable	Rojo	

Para hallar el valor o puntaje de esa relación para cada una de las tecnologías escogidas se usó la ecuación 1 la cual determina el color que debe de llevar y así mencionar en qué medida es o no favorable la tecnología.

$$\frac{\text{Puntaje}}{\text{valor}} = \frac{\text{Costo mínimo}}{\text{Costo tecn.}} \times 5 \quad \text{Ec 1}$$

Costo mínimo: es el menor costo entre las tecnologías.

Costo tecn: el costo de la tecnología que se está evaluando

Se multiplica por 5 ya que los criterios que se muestran en la tabla 2 van en una escala de 1 a 5 [40].

Con estos datos, se calculó el Retorno de Inversión (ROI) y el Período de Recuperación (Payback) con las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 que se muestran en la tabla 3, determinando así la factibilidad económica de la propuesta para el usuario final.

Tabla 3.

Cálculos para el porcentaje de retorno

Tema de interés	Fórmula matemática	Nº ecuación
Ingresos	$\text{Ingresos} = \text{cantidad} \times \text{precio de venta}$	Ec 1
Ingreso anual	$\text{Ingreso anual} = 12 \times \text{ingreso mensual}$	Ec 2
Porcentaje de retorno	$\text{ROI (\%)} = \frac{\text{beneficio neto}}{\text{inversión inicial}} \times 100$	Ec 3
Beneficio neto	$\text{Beneficio neto} = \text{Ingresos} - \text{inversión}$	Ec 4
Años de recuperación	$\text{Años de recuperación} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ingresos anuales}}$	Ec 5

3.3.4. Actividad 4. Dimensionamiento y esquema del sistema acuapónico

3.3.4.1. Dimensionamiento Biológico y Agronómico.

El diseño del modelo a escala unifamiliar partió del establecimiento de la capacidad de carga biológica necesaria para contribuir a la seguridad alimentaria de un núcleo familiar promedio. Primero, se determinó la biomasa íctica máxima soportada y la densidad de siembra objetivo. Con base en la tasa de alimentación y la consecuente excreción de nutrientes (nitrógeno disponible), se calculó el área de cultivo requerida para garantizar la fitorremediación del agua. Para la sección hidropónica, se empleará la relación matemática entre el área total disponible en la estructura vertical y el área vital requerida por cada planta (según su marco de plantación), lo que permitió calcular matemáticamente la capacidad máxima de siembra por nivel ajustándolo al

número de personas que van a utilizar el sistema. Los cálculos para hallar todas las dimensiones anteriormente mencionadas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Formulas y cálculos para el dimensionamiento del sistema acuapónico.

Dimensiones	Formula	Nº de ecuación
Consumo total de peces	Producción = personas $\times$ consumo (kg/persona/año)	Ec 6
Numero de peces	Numero de peces= producción total $\div$ peso por pez	Ec 7
Alimento diario	Alimento diario = Kg de peces $\times$ 1,5%	Ec 8
Área de cultivo	Área de cultivo (m ²)= $\frac{\text{alimento diario}}{60-100\text{g/día}}$	Ec 9
Peso total de la biomasa.	Biomasa= número de peces $\times$ peso por pez	Ec 10
Volumen del tanque	Volumen = $\frac{\text{Biomasa}}{\text{Densidad}}$	Ec 11
Dimensiones del tanque	Volumen= $\pi \times \text{radio}^2 \times \text{altura}$	Ec 12
Dimensiones para el área del cultivo	Área del cuadrado = L ²	Ec 13
Numero de plantas/ m ² de cultivo	Plantas/ m ² = $\frac{\text{Área}}{\text{distancia entre plantas} \times \text{distancia entre filas}}$	Ec 14

3.3.4.2. Diseño Hidráulico y Electromecánico.

Para asegurar el correcto tratamiento de las aguas no convencionales dentro del sistema cerrado, se formularán los cálculos hidráulicos que rigen la dinámica de fluidos. Se calculará el caudal de diseño (Q) en función del volumen total proyectado para el tanque y la tasa de recirculación necesaria (volúmenes/hora) para mantener las concentraciones de OD y optimizar la conversión eficiente de NH_4^+ a NO_3^- . Adicionalmente, se calculará la Carga Dinámica Total (TDH), sumando la altura topográfica máxima de la estructura vertical y las pérdidas por fricción generadas por la tubería y sus accesorios. Este procedimiento matemático será el criterio técnico estricto para la posterior selección del equipo de bombeo y los mecanismos de aireación pasiva.

3.3.4.3. Modelado Estructural y Planimetría.

Una vez definidos los requerimientos volumétricos e hidráulicos, se procederá a la esquematización espacial del sistema. Se diseñó una estructura de configuración vertical orientada a minimizar el área construida, optimizando el sistema para patios o terrazas urbanas. El diseño

final se consolidará mediante herramientas de dibujo técnico o diseño asistido (CAD), generando un diagrama de flujo hidráulico que detalla las líneas de impulsión, los retornos por gravedad, las válvulas de derivación (bypass) y la disposición de las camas de sustrato, garantizando así la replicabilidad técnica del modelo.

Capítulo 4: Resultados y Discusión

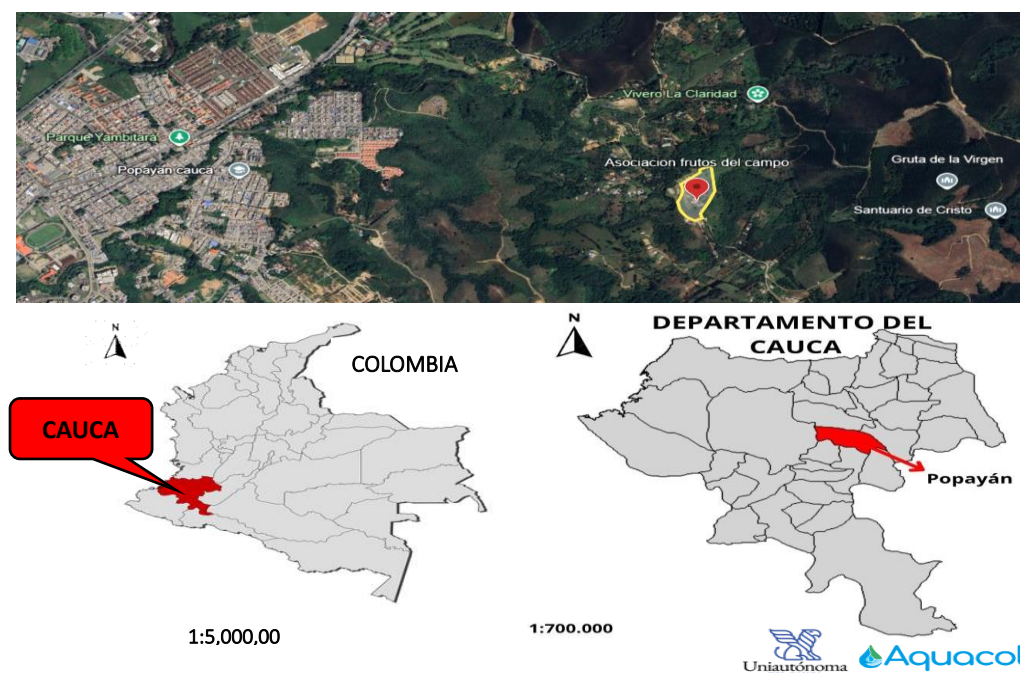
4.1. Fase I. Monitoreo de los parámetros fisicoquímicos del agua

4.1.1. Actividad 1. Reconocimiento del sistema

El sistema acuapónico a gran escala objeto de estudio, se encuentra ubicado en la vereda la Claridad, en la asociación frutos del campo en la ciudad de Popayán – Cauca como se evidencia en la figura2. La zona presenta condiciones climáticas propias de un clima templado, con temperatura media de 17,8 °C, precipitación media de 2,127 mm [41]. El municipio de Popayán presenta un régimen climático de tipo bimodal, caracterizado por dos temporadas secas y dos lluviosas a lo largo del año. Los meses que presentan menor precipitación están entre junio y agosto, mientras que las lluvias predominan durante el resto del año, alcanzando sus máximos entre octubre y diciembre [42]. Este sistema se impulsó a través de Aquacol, con el objetivo de evaluar la viabilidad económica y alimentaria para la población de la vereda la claridad, específicamente en la asociación frutos del campo.

Figura1.

Ubicación del sistema Acuapónico Asociación frutos del Campo

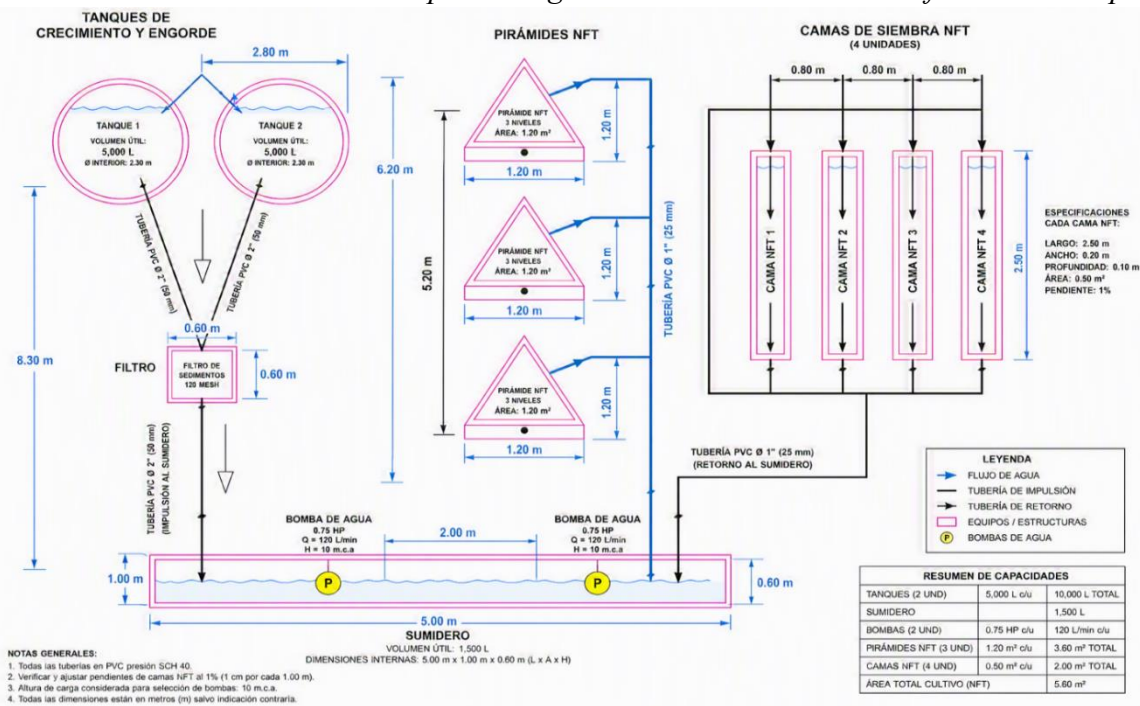


Nota. Elaboración propia a través de Google Earth

En la figura 2 se muestra el plano de diseño hidráulico y de distribución estructural del sistema acuapónico a gran escala donde se muestra que componentes lo constituyen, el cual cuenta con un área construida de 400 m² y maneja un volumen de agua de 40 m³, no utiliza materiales de construcción para edificaciones u obra civil, cuenta con estructuras más convencionales hechas con materiales extraídos del mismo sitio ya que la estructura principal (soporte) está hecho en guadua (madera resistente, familia del bambú). Las paredes del sistema se encuentran cubierta en plástico transparente para la fácil entrada de luz solar. Mientras que el techo donde se encuentran tanques de engorde y alevinaje, filtros y parte del sumidero está cubierto por techo de metal que evita la exposición directa a la luz solar para prevenir modificaciones de los parámetros del agua, principalmente la temperatura. Por otra parte, donde se encuentran las pirámides de siembra, camas de sustrato y parte del sumidero, tiene techo de plástico transparente, que permite la entrada de una mayor cantidad de luz solar que favorece los procesos biológicos de las plantas. Por su lado, el suelo no está cubierto por ninguna capa de concreto u otro material, está en su forma natural (tierra).

Figura 2.

Plano estructural del sistema acuapónico a gran escala de la Asociación frutos del campo



Nota. Elaboración propia con ayuda de AutoCAD y IA generativa Copilot.

El sistema se compone por varias partes las cuales cada una tiene una función importante y a continuación se describen cada una de ellas:

4.1.1.1. Tanques de engorde.

En estos tanques se recibe a los peces ya comprados en la zona rural del municipio de Puracé específicamente en la población de Coconuco, en los cuales se la función de crecimiento y engorde, son tanque hechos en una estructura circular de metal cubierta en lona de color negro los cuales tiene un volumen de 5000L y pueden recibir máximo 200 alevinos.

4.1.1.2. Filtros.

La función principal es retener todas las heces de los peces o restos de comida y evitar su descomposición dentro del sistema, y al mismo tiempo alteración de la calidad del agua por el aumento de NH_3 . De igual forma, se reducen enfermedades en los peces y la pudrición de las raíces de los vegetales. Estos filtros se componen de una caja en plástico que contiene una malla en tela, un lecho de sustrato (grava) y en su fondo, una malla hecha en plástico.

4.1.1.3. Tanques de alevinaje.

Son tanques (6) de forma rectangular y de plástico, que cumplían la función de recibir los peces jóvenes que eran comprados de productores fuera de la ciudad. Los alevinos se repartían en cada tanque en un máximo de 50 peces. Este procedimiento se realizaba para la adaptación de los peces a la nueva corriente de agua que se daba en el sistema, evitando el estrés al entrar a un hábitat nuevo.

4.1.1.4. Pirámides de siembra.

Estas estructuras en forma de pirámide son hechas en tubos de PVC con orificios de diámetro de 2 cm que permitan la entrada de la raíz de la planta, las cuales se encontraban en un estado de germinación para siembra y cosecha. Las pirámides se conectan mediante a mangueras a sus costados donde permite el flujo del agua de forma mecánica, impulsada por una bomba. Este tipo de cultivo presenta un flujo de agua constante que circula en el sistema lleno de nutrientes. Su composición es de manera escalonada para que todas las plantas tengan una exposición al sol completa.

4.1.1.5. Camas de sustrato.

Son contenedores en forma de bandeja que contienen material inerte en el cual se siembran las plantas (tomate purro, acelga, pimentón, cebollín y lechuga) en este caso se utiliza grava debido a que su porosidad retiene los nutrientes que se encuentran en el agua [43]. Tienen forma rectangular con estructura de metal cubierta de lona negra, en medio de ella se encuentra un tubo de PVC de ½ pulgada el cual contiene orificios por donde sale el agua que llega impulsada desde el sumidero por una bomba.

4.1.1.6. Sumidero.

Esencial para la transformación de los NO_2^- a NO_3^- por función de las bacterias que allí se encuentran, tiene una forma rectangular con un ancho de 1 m x 9 m de largo. Su construcción está hecha dentro del suelo del lugar aislado por lona negra. En este se alberga carpa común para su limpieza y prevenir la proliferación de algas. Además, se siembran plantas recién germinadas, especialmente la lechuga, mediante sistema hidropónico para su posterior trasplantación hacia las pirámides, adecuadas para su crecimiento.

4.1.1.7. Sifones.

En esta parte del sistema se tienen cuatro puntos (cuatro sifones), son la parte final de cada una de las camas de sustrato, por donde se drena el agua que sale de ellas direccionándola de nuevo al sumidero. Lo anterior se muestra en la figura 2. Los sifones son importantes debido a que mantienen un flujo constante del agua, Los sifones son uniones tipo T en material de PVC de 4" (pulgadas) para fácil absorción del agua.

4.1.1.8. Peces.

Los peces que se utilizaron para la siembra fueron truchas arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) de la familia salmonidae, es un pez de agua dulce y salada. Es una especie de trucha nativa de Norteamérica, Asia y afluentes de agua fría del pacífico [44]. Para su crecimiento se necesita que el agua cumpla varios requisitos que se especifican en la tabla 5 [45].

Tabla 5.

Rango de parámetros fisicoquímicos para el cultivo de trucha arcoíris

Parámetro	Valor recomendado
pH	6,4-8,5
Temperatura	16°C - 21°C
OD	5 mg/L - 8 mg/L

También se utilizaron peces en el sumidero para la limpieza de algas, estas son las carpas, estas son más flexibles a variaciones de temperatura en el agua (15°C-30°C) [46]. Están prohibidas para la piscicultura extensiva ya que se reproduce fácilmente y al no contar con un control moderado puede llegar a ser una especie invasora [47].

La producción de peces cuenta con un ciclo productivo el cual muestra en qué etapa productiva se encuentran, para la trucha arcoíris esa información se muestra en la tabla 6.

Tabla 6.

Ciclo y etapa productiva de la trucha Arcoíris (Oncorhynchus mykiss)

Ciclo Productivo		
Duración (días)	Peso promedio alcanzado (gramos)	[48]
180	350	
Etapas Productivas		
Alevinaje (g)	Levante (g)	Engorde (g)
1 - 38	39 - 119	120-350

Para calcular la cantidad de peces que pueden sembrarse en un tanque dentro de un sistema acuapónico, se debe partir de la densidad de cultivo recomendada para la especie, que en el caso de la trucha se sitúa entre 10 y 15 kg/m³, siempre que las condiciones del agua sean adecuadas; es

decir, con temperatura y pH dentro de rangos óptimos y una concentración de OD superior a 6 mg/L como se muestra en la tabla 6 [49]. A partir de estos parámetros, el número de peces se calcula partiendo de la biomasa máxima que puede soportar el tanque dividida entre el peso promedio individual (Ecuación 15) [50]. A el número de peces inicial se le suma el porcentaje de reposición (10%) para compensar las pérdidas que haya a medida que transcurra el ciclo de producción (Ecuación 16) [50].

$$\text{N}^{\circ} \text{ de peces} = (\text{Densidad (kg/m}^3) \times \text{Volumen del tanque (m}^3) / \text{Peso promedio (kg)} \quad \text{Ec 15}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ animales} + 10\% = \text{N}^{\circ} \text{ animal. a sembrar} \quad \text{Ec 16}$$

4.1.1.9. Plantas.

En su mayoría los vegetales que se sembraron fue la lechuga por su facilidad y poco tiempo de cosecha, también se cosecharon tomate, acelga y pimiento, todas las anteriores no presentan problemas para ser cultivadas en el clima que presenta la zona [51]. Sin embargo, se debe tener en cuenta los rangos permisibles para su siembra que se muestran en la tabla 7 [52].

Tabla 7.

Parámetros ideales para la siembra de plantas en un sistema acuapónico

Parámetro	Rango
pH	5,5 - 6,5
Temperatura	18 °C - 26 °C
OD	> 5 mg/L
Conductividad Eléctrica	0,3 - 1,5 mS/cm
NO ₃ ⁻	40 - 200 mg/L
NO ₂ ⁻	0 - 1 mg/L
Amonio	< 1,5 mg/L
Iluminación	12 - 16 horas al día

4.1.1.10. Bacterias Nitrificantes (BN).

Las BN son microorganismos esenciales en los sistemas acuapónicos, ya que desempeñan un papel determinante en la estabilidad y sostenibilidad del sistema. Su función principal consiste en transformar los desechos nitrogenados generados por los peces en formas asimilables por las plantas, actuando como un enlace biológico entre ambos componentes del sistema [53]. Este proceso se realiza en dos etapas: las bacterias Nitrosomonas oxidan el NH_3 a NO_2^- , mientras que las Nitrobacter convierten estos NO_2^- en NO_3^- , forma de nitrógeno que es absorbida por las plantas [53].

En el manejo del sistema, se aplicó una dosis de 25 mL de bacterias nitrificantes, previamente diluidas en un balde con 30 L de agua. De esta solución, se distribuyeron 10 L en los tanques TCE1 y TCE2, 10 L en el sumidero y los 10 L restantes en las camas de sustrato, buscando una colonización homogénea en todo el sistema. Es importante señalar que pequeñas variaciones por encima de la dosis recomendada no generan efectos negativos, siempre que no sean excesivas o desproporcionadas.

La existencia de los nutrientes es un proceso gradual; aproximadamente después de 25 días se evidenció la disponibilidad de nutrientes para las plantas, considerando que la conversión completa del nitrógeno, especialmente de NO_2^- a NO_3^- , puede tardar entre 15 y 20 días [54]. Con el fin de mantener la eficiencia del proceso, se realizaron aplicaciones periódicas cada 40 días, teniendo en cuenta que la población bacteriana puede disminuir significativamente alrededor de los 60 días [55]. Para este sistema se emplearon bacterias nitrificantes comerciales de la marca Cycle, reconocidas por su uso en la activación biológica de sistemas acuáticos.

También es importante resaltar los parámetros y sus rangos permisibles de forma general ya que los componentes que tiene el sistema funcionan de forma integral para que no haya afectaciones como proliferación de enfermedades, estrés para los peces, pudrimiento y/o falta de nutrientes para las plantas. Estos mantienen una relación para el funcionamiento óptimo del sistema y calidad del agua estos valores se ven en la tabla 8 [56].

Tabla 8.*Parámetros fisicoquímicos y rangos permisibles para las BN*

Parámetro	Rango
pH	6,4 - 7,0
Temperatura	18°C - 26°C
OD	>5 mg/L - 8 mg/L
NO ₂ ⁻	0- 1 mg/L, pero el ideal es >0,5 mg/L
NO ₃ ⁻	40 - 80 mg/L
Nitrógeno amoniacal (NAT)	0,10mg/L – 0,25mg/L
Conductividad	0,15mS/cm – 0,7 mS/cm

4.1.1.11. Potencial hidrógeno (pH).

El pH es un parámetro fundamental en los sistemas acuapónicos, ya que determina si el agua es ácida, neutra o alcalina, influyendo directamente en el bienestar de los peces, la actividad de las bacterias nitrificantes y la disposición de nutrientes para la absorción de las plantas [57]. Antes de introducir los peces, el agua se acondiciona a un rango óptimo; en este caso, al emplear agua de lluvia (6,4-8,5), se corrige con carbonato de calcio (100 g/1000 L), mientras que para valores altos de pH se utiliza ácido nítrico (10 mL diluidos en 20 L de agua para todo el sistema).

Un pH bajo puede provocar acidosis en los peces, afectar la absorción de nutrientes en las plantas y limitar la nitrificación; por el contrario, un pH alto favorece la formación de amoníaco tóxico, reduce la eficiencia bacteriana y dificulta la disponibilidad de nutrientes [57]. Por ello, mantener el pH estable es fundamental para el funcionamiento correcto y el equilibrio del sistema.

4.1.1.12. Temperatura.

La temperatura del agua es el parámetro que indica el nivel de calor presente en el medio acuático, influyendo directamente en los procesos biológicos, químicos y físicos del sistema. Este parámetro afecta a otras variables fisicoquímicas si se presentan cambios bruscos [58]. Es importante mantener una temperatura estable para garantizar la eficiencia del sistema debido a que

influye en los procesos metabólicos, la actividad bacteriana, disolución del oxígeno en el agua y el desarrollo y crecimiento de las plantas [59].

4.1.1.13. Oxígeno Disuelto (OD).

Parámetro indispensable tanto para el funcionamiento del sistema como para la supervivencia de los organismos que se encuentran en el (peces, plantas y bacterias nitrificantes). Un nivel de OD adecuado se garantizará que el sistema tenga un desarrollo saludable para plantas y peces, optima estabilidad biológica y un trabajo eficiente de las BN [60]. Cuando los niveles son bajos, se produce hipoxia, genera estrés, disminución del apetito, alteraciones fisiológicas y, en casos severos, mortalidad por asfixia [61]. Por el contrario, concentraciones altas pueden provocar sobresaturación, lo que favorece la formación de burbujas en los tejidos (enfermedad de la burbuja gaseosa), afectando la circulación y el equilibrio de los peces [61]. Durante la investigación, no hubo mortandad de peces por alteraciones de OD debido a la oxigenación por medio de las bombas y la circulación constante del agua.

4.1.1.14. Nitrógeno amoniacal total (NAT).

Se compone de amonio no ionizado (NH_3) y amonio ionizado (NH_4^+) los cuales están en equilibrio dependiendo del pH del agua y su temperatura. El NAT es el componente que da inicio al proceso de nitrificación ya que de este se da inicio con la transformación a NO_2^- [62]. Cuando sus niveles se elevan, especialmente en NH_3 , se genera toxicidad que afecta las branquias, dificulta la respiración y puede provocar estrés severo o mortalidad. Por el contrario, concentraciones muy bajas suelen indicar una limitada disponibilidad de nutrientes para las bacterias nitrificantes, lo que puede afectar el equilibrio del sistema [63]. En el periodo de estudio no se observaron alteración del NAT, ya que el sistema presentaba excesivas concentraciones de BN, por lo tanto, el objetivo del estudio se enfocó a los NO_2^- y NO_3^- , siendo los NO_2^- el parámetro tóxico a bajas concentraciones para los peces [64].

4.1.1.15. Nitritos (NO_2^-).

Originarios del NH_3 , los NO_2^- son compuestos que se encuentran intermedios en el proceso del ciclo del nitrógeno que se da en el sistema por la transformación que sufre el NH_3 por acción de los nitrosomas [64]. Tienen elevada toxicidad por esa razón su presencia debe ser mínima por el riesgo a afectar la salud de los peces [65]. Concentraciones elevadas interfieren con el

transporte de oxígeno en la sangre, provocando dificultades respiratorias, estrés fisiológico y debilitamiento general, niveles controlados indican que las BN están realizando adecuadamente la transformación del nitrógeno dentro del sistema [66].

Los NO_2^- es uno de los parámetros de monitoreo constante debido a su toxicidad, para controlar la concentración en exceso de este compuesto se disminuía la ración de alimento, para así minimizar su metabolismo y la producción de amoníaco. Otro efecto directo del exceso de los NO_2^- fue la disminución del pH, que era controlado agregándole 100 g de carbonato de calcio disuelto en 4 L de agua.

4.1.1.16. Nitratos (NO_3^-).

Es el resultado final del ciclo del nitrógeno, este es la parte más estable de ese ciclo y tiene como objetivo principal ser el proveedor de nitrógeno para las plantas, este no resulta ser tóxico para los peces en concentraciones moderadas a diferencia del NH_3 y NO_2^- [67]. Sin embargo, todo ese proceso es fundamental para la producción de nutrientes para las plantas [68]. Las concentraciones excesivas pueden generar estrés fisiológico y afectar la calidad del agua a largo plazo, para controlar esa problemática se reducía la ración alimenticia con el fin de reducir la producción de amoníaco y generar una acción en cadena, lo cual consta de reducir NO_2^- para así reducir su conversión a NO_3^- . Por otro lado, niveles muy bajos pueden limitar el crecimiento y desarrollo vegetal debido a una menor disponibilidad de nutrientes [69] .

4.1.1.17. Conductividad.

Es un parámetro que mide la cantidad de sales y nutrientes disueltos en el agua, reflejando su capacidad para conducir electricidad. En términos prácticos, permite evaluar si existe un equilibrio adecuado entre los desechos generados por los peces, la actividad bacteriana y la absorción de nutrientes por las plantas, siendo clave para garantizar un desarrollo saludable y eficiente de todo el sistema [70]. Valores bajos pueden evidenciar deficiencia de nutrientes y limitar el desarrollo vegetal, mientras que concentraciones excesivas favorecen la acumulación de sales, generando estrés en los organismos y afectando la estabilidad del sistema [71].

4.1.1.18. Alimentación Diaria.

La alimentación diaria para los peces dependía en la etapa de crecimiento que se encontraban, que para cada una de estas se debe suministrar unos rangos de cantidad de alimento

específico (Tabla 9). Sin embargo, hay que tener en cuenta que para ese valor se deben hacer cálculos dependiendo de los animales y la etapa evolutiva en los que estos se encuentren [72].

Tabla 9.

Porcentaje de alimento para cada etapa productiva.

Etapa productiva	%biomasa
Alevinaje (1-45g)	10-4
Levante (46-180g)	4-2,7
Engorde (180)-500+)	2,7-1,2

Para calcular la cantidad de alimento diario que se suministra a cada uno de los tanques se inicia hallando el peso total de los peces (Ecuación 17) [72].

$$\text{Peso total peces (kg)} = \text{N}^{\circ} \text{ de peces} \times \text{Peso promedio del lote (kg)} \quad \text{Ec 17}$$

Posteriormente, se calcula la cantidad de alimento por día (Ecuación 18), escogiendo el porcentaje de biomasa que se va a emplear (Tabla 9), que por lo general se escoge el porcentaje menor para no producir una cantidad excesiva de compuestos nitrogenados [72].

$$\text{Alimento/día (g/día)} = \text{Peso Total (g)} \times \text{Biomasa (\%)} \quad \text{Ec 18}$$

4.1.2. Actividad 2. Medición parámetros fisicoquímicos

Para entender el funcionamiento del sistema se seleccionaron tres puntos de monitoreo en los cuales se presentaba actividad importante para mantener el equilibrio de este, también se estableció que parámetros se tomaban en un lugar para dar un resultado general y cuales debían tomarse de manera individual para cada componente escogido. Los puntos escogidos fueron tanques de engorde y crecimiento (2 tanques), el sumidero y los sifones de las camas de sustrato (4 sifones) los cuales se muestran en la figura 2, no se tomaron más referencias para muestrear ya que las directrices del sistema no lo permitían.

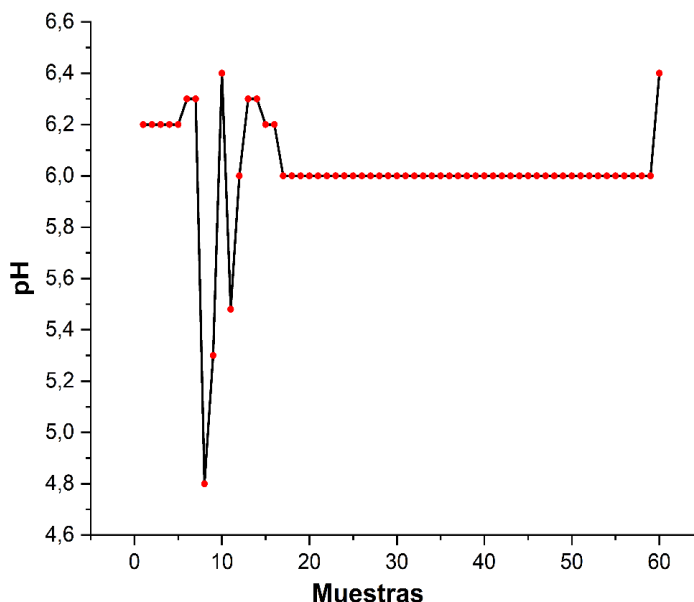
Los datos sobre la medición de parámetros fisicoquímicos se encuentran en el anexo A. con estos se procede a mostrar los resultados para cada uno.

4.1.2.1. Potencial hidrógeno (pH)

En la figura 3 se muestra la variación del pH durante la toma de datos durante los 2 meses de monitoreo.

Figura 3.

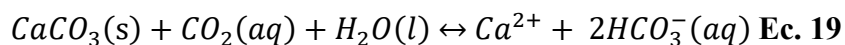
Variación de los valores del pH en el sistema acuapónico



La figura 3 muestra una estabilidad general del sistema entorno a un pH cercano de 6,0 con disminuciones significativas hasta un pH cercano de 4,8. Asimismo muestra que hay valores de pH que no sobrepasan los límites de pH (8,0). Los valores bajos de pH debido a la concentración de NH_3 , resultado del metabolismo de los peces [73]. También podría deberse por la descomposición anaerobia de materia orgánica (alimento y heces fecales) que genera ácidos orgánicos (ácido acético) y a al CO_2 que produce la oxidación de la materia que al disolverse al agua genera ácido carbónico, proceso generado por el mal funcionamiento de los filtros por la falta de limpieza, lo que satura el sistema de materia orgánica [57].

En los casos de cambios de pH, se realiza una corrección para aumentar el pH mediante el uso de carbonato de calcio (CaCO_3), el cual actúa como amortiguador natural para subir el índice de alcalinidad en el agua [57]. Este compuesto actúa como un amortiguador natural que sube el pH del agua de una manera progresiva gracias a que se disuelve lentamente a comparación de otros compuestos. Debido a lo anterior no genera un cambio brusco que pueda afectar a los peces y BN

[74]. Para su implementación es necesario que se disuelva en agua y de forma gradual y controlada para evitar peligros al introducirlo de manera directa [75]. La reacción química que se efectúa al introducir el CaCO_3 es la que se muestra en la ecuación 19 [75]:



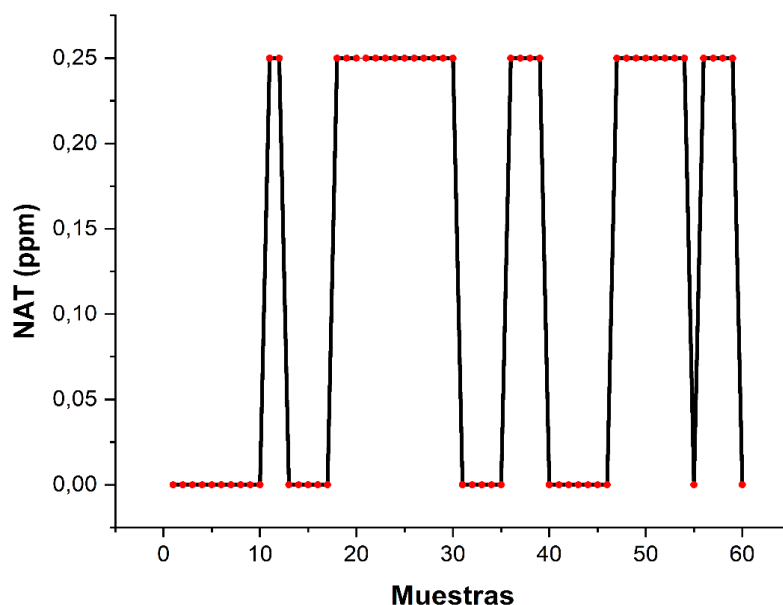
Al haber CO_2 disuelto en el agua por respiración de peces este reacciona con el agua y forma el ácido carbónico (H_2CO_3) que a su vez reacciona con el CaCO_3 , liberando calcio y bicarbonato (HCO_3^-), que produce un sistema tampón que evita el aumento drástico del pH al neutralizar ácidos [74]. La dosis que se aplicó fue de 100 g de CaCO_3 disuelto en 4 L de agua, después de 30 minutos se midió nuevamente el pH, si aún no llegaba al valor deseado se volvían a agregar otros 100 g. Este proceso se realizó hasta ajustar el pH.

4.1.2.2. Nitrógeno Amoniacal Total (NAT).

En la figura 4 se muestra cómo se comportan los datos de NAT durante la toma de muestras en los 2 meses de monitoreo.

Figura 4.

Variación de NAT en el sistema acuapónico



La figura 4 muestra como la concentración de NAT se mantiene por debajo de 0,25 ppm, valor que se encuentra dentro de los límites permisibles para el adecuado desarrollo de organismos en sistemas acuapónicos. Este comportamiento evidencia una operación eficiente de BN, las cuales llevan a cabo la oxidación biológica del NH_4^+ generado tanto por la mineralización del alimento suministrado como por los productos de excreción metabólica de los peces [63].

En este contexto, la estabilidad de las concentraciones de NAT sugiere que el sistema mantiene un equilibrio funcional en los procesos de transformación del nitrógeno, evitando la acumulación de compuestos tóxicos. Consecuentemente, se infiere que tanto los peces como las plantas se desarrollaron bajo condiciones adecuadas, sin signos de estrés asociados a la calidad del agua [63].

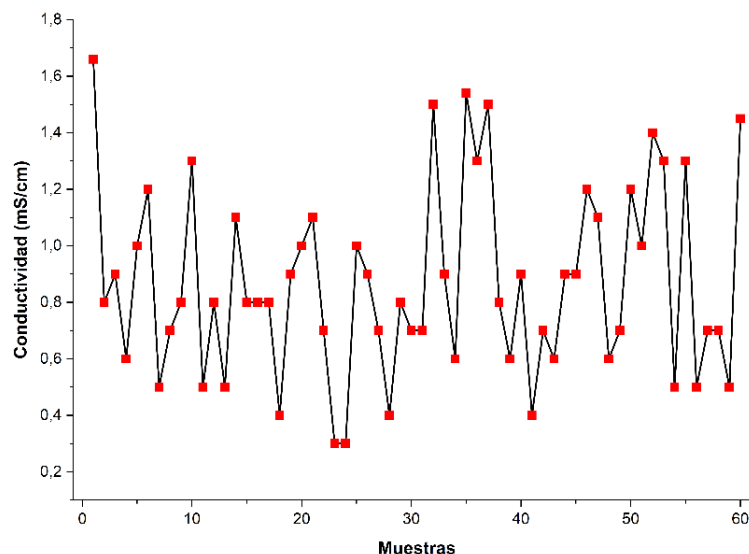
Adicionalmente, parámetros críticos como OD y pH se mantuvieron dentro de rangos estables. Esta condición sugiere una baja acumulación de materia orgánica en el sistema, lo que a su vez reduce la demanda biológica de oxígeno y contribuye a la conservación de un ambiente acuático óptimo para los organismos cultivados [76].

4.1.2.3. Conductividad.

En la figura 5 se muestra el comportamiento de los datos para la conductividad, medida que es importante para relacionar el valor de nutrientes y sales disueltos en el agua. Permite la identificar si hay una concentración adecuada de nutrientes para el crecimiento de las plantas y adecuadas condiciones para los peces y plantas [56].

Figura 5.

Variación de datos de conductividad en el sistema acuapónico.



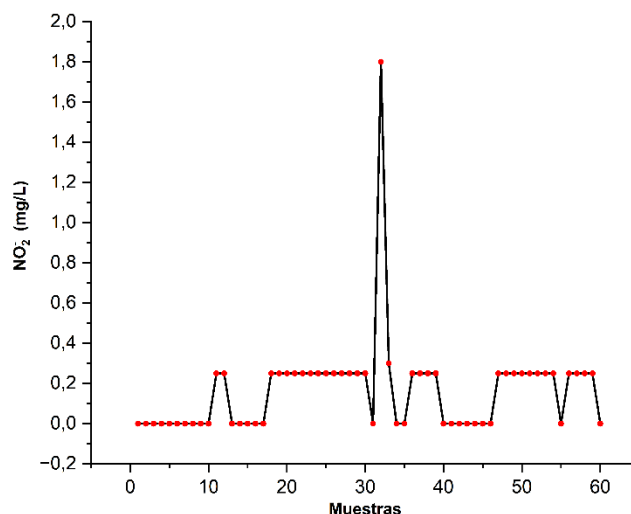
En la figura 5 se observa una variabilidad de los valores de conductividad a lo largo del periodo de monitoreo, lo que refleja una dinámica iónica cambiante. Dentro de estas variaciones, destaca un valor máximo cercano a 1,65 mS/cm, el cual supera el rango permisible recomendado (0,3–1,5 mS/cm), indicando un incremento temporal en la concentración de sales disueltas. Este aumento en la conductividad está directamente asociado a la acumulación de compuestos nitrogenados oxidados, particularmente (NO_2^-) y (NO_3^-), productos de la actividad metabólica de las BN encargadas de transformar el NH_4^+ proveniente de los residuos orgánicos y la excreción de los peces [77].

No obstante, el incremento observado también sugiere una limitada tasa de asimilación de dichos nutrientes por parte de las plantas en determinados períodos, lo que conlleva a una acumulación de iones en el sistema. Este desbalance entre la producción microbiana de nutrientes y su absorción vegetal se traduce en picos de conductividad, sin que necesariamente se comprometa la estabilidad general del sistema [78].

Nitritos (NO_2^-) En la figura 6 se presenta las variaciones que hubo del valor de los NO_2^- durante el monitoreo (2 meses)

Figura 6.

Variaciones de NO_2^- en el sistema acuapónico



Los resultados obtenidos de los NO_2^- (Figura 6) muestran una variación de entre 0,0 - 0,25 mg/L, con un sobrepaso de la concentración del valor máximo permisible (0,25 mg/L). El aumento de la concentración de NO_2^- provocó la muerte de peces en su mayoría de tamaño pequeño causado por su etapa parcial de desarrollo, debido al estrés osmótico que altera el equilibrio de la sangre y que afecta su metabolismo y la regulación de agua y minerales [79]. Es importante mantener los NO_2^- por debajo de 0,10 mg/L [80]. Sin embargo, en este sistema no se presenció una problemática que fuera repetitiva o extensa referente a la cantidad de NO_2^- en el agua, el muestreo dio un promedio de 0,16 mg/L dando a entender que se puede cultivar peces bajo esta condición. Se tenía como plan de emergencia para un posible problema por el incremento de los NO_2^- las siguientes dos acciones:

1. Disminuir la cantidad de alimentación, lo que disminuye la concentración de amonio y por tanto reduce la concentración de NO_2^- en el sistema, una opción segura pero lenta.
2. Disolver sal marina en el agua del sistema, es una opción más rápida y efectiva pero no tan segura ya que no reduce la cantidad de NO_2^- , pero si protege las branquias temporalmente

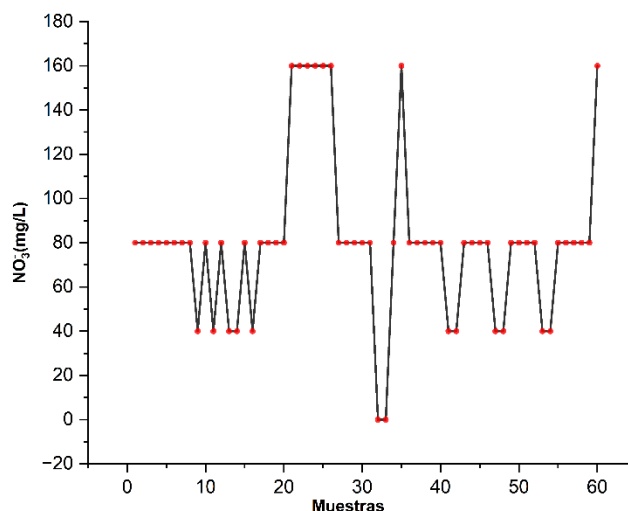
por competencias entre el cloruro y los NO_2^- [81]. Si se emplea una cantidad incorrecta puede generar problemáticas para todos los organismos vivos en el sistema [82].

4.1.2.4. Nitratos (NO_3^-).

Para el muestreo de NO_3^- también tomo como valor de referencia (mg/L), los datos se muestran en la figura 7.

Figura 7.

Variación del NO_3^- en el sistema acuapónico



Para los valores de NO_3^- en el sistema acuapónico se observó que hubo un valor inferior a 40 mg/L llegando a 0 mg/L lo cual pudo ser ocasionado por la poca cantidad de BN en el agua o por una absorción excesiva de las plantas, lo anterior es peligroso para el sistema si se presenta en varias tomas de muestras, ya que al no haber una cantidad entre estos valores (40-80 mg/L) no hay suficientes nutrientes para las plantas por lo cual se genera un crecimiento débil [68]. En el valor máximo si se identificaron datos con valores mayores a lo permisible hasta llegar a 160 mg/L, ocasionado por el alza en los niveles de materia orgánica acumulada (alimento no consumido) y la no renovación de agua en el sistema [69].

Durante estos muestreos no hubo afectaciones para las plantas, pero si hubo muertes de peces cuando hubo menos cantidad de NO_3^- , en su mayoría aquellos que eran de tamaño pequeño, con órganos y branquias no tan desarrollados, siendo en ese caso los más sensibles a estos cambios,

por lo cual como se mencionó anteriormente hubo una reducción en el valor de nitratos, aumentando así la cantidad de nitritos lo cual genera una asfixia a los peces y produce su deceso [79].

Para controlar este problema se emplearon plantas de rápido crecimiento, ya que a esos niveles altos se puede concluir que los filtros no están funcionando bien, para eso los cultivos vegetales necesitaron fortalecerse para un aumento en absorción de NO_3^- procurando de sembrar plantas de manera flotante (lechuga) en el área del sumidero para que absorban de manera directa todos los nutrientes. También se realizó una limpieza sobre las zonas acuáticas evitando la acumulación de materia orgánica como plantas, restos de alimento no consumido y heces de peces para así reducir la generación de compuestos nitrogenados que se producen por su descomposición [83].

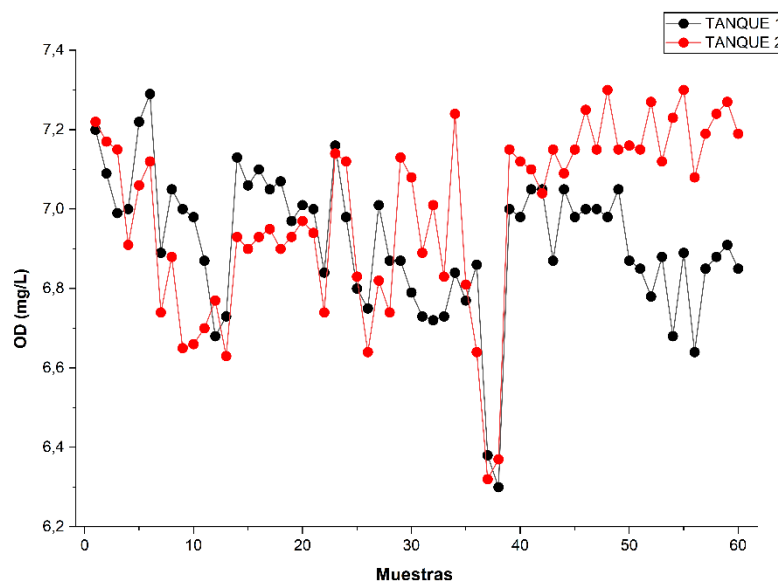
Los parámetros fisicoquímicos descritos previamente fueron determinados mediante un kit multiparamétrico el cual requiere únicamente una pequeña muestra de agua para proporcionar una evaluación general de las condiciones del sistema acuapónico [32]. Por lo tanto, los resultados que se muestran a continuación se tomaron de forma individual para los tanques de crecimiento y engorde, sumidero y camas de siembra. Los parámetros que se midieron individualmente fueron el OD y la temperatura.

4.1.2.5. Temperatura y OD

Los valores de OD y temperatura se muestran juntos ya que se tomaron con el mismo equipo ambos datos, los resultados se muestran en la figura 8.

Figura 8.

Variación del OD en los tanques de crecimiento y engorde 1 y 2 en el sistema acuapónico.

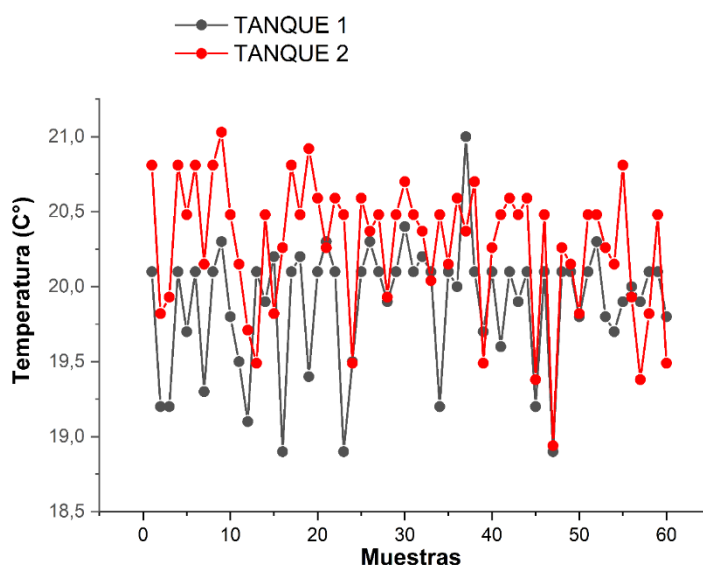


Los valores de OD que se muestran en la figura 8 se evidencia que ninguno de los datos estuvo por debajo de la mínima (<5 mg/L) y no se presenció que estuvieran por encima de la máxima (>8 mg/L). La diferencia que hay entre tanques se debe a que el TCE1 contenía una cantidad de peces más que el TCE2 por lo cual hay más demanda de consumo de OD por parte de estos por sus procesos metabólicos, además al haber más peces hay más desechos nitrogenados (amonio) aumentado la actividad bacteriana y a su vez el consumo de oxígeno por las BN [89]. Esta diferencia no afectó el ciclo natural del sistema, calidad del agua y el crecimiento de peces y vegetales ya que ninguno tuvo una reducción e incremento excesivo y peligroso.

La figura 9 muestra como la temperatura para los tanques no sobrepasa ninguno de los límites permisibles (18°C - 26°C), se tiene en cuenta que no están expuestos directamente a la luz del sol, el agua está en constante movimiento y la estructura del sistema cuenta con constante aireación por lo cual se mantienen a temperatura ambiente sin necesidad de utilizar dispositivos que reduzcan o suban la temperatura.

Figura 9.

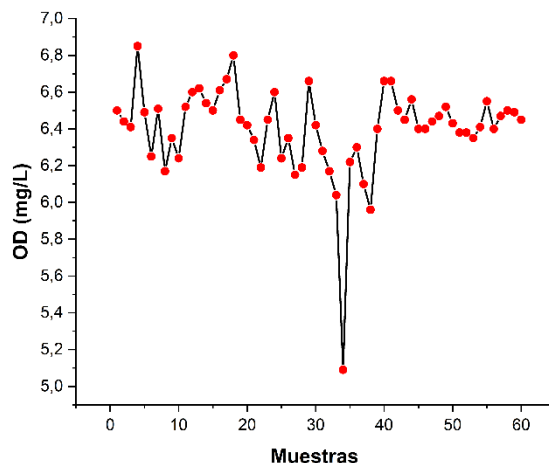
Variación de datos de temperatura en los tanques de crecimiento y engorde 1 y 2 en el sistema acuapónico



En caso de que el sistema presente alguna de las situaciones descritas anteriormente, sería necesario implementar estrategias que permitan aumentar y estabilizar la temperatura del sistema. Una de ellas consiste en utilizar materiales aislantes que retengan el calor conservado durante el día, evitando reducciones bruscas de temperatura durante la noche. Asimismo, se recomienda que la estructura del sistema sea cerrada o parcialmente cubierta, con el fin de conservar el calor captado durante las horas de radiación solar y mantener condiciones térmicas más estables entre el día y la noche. Otra alternativa es optimizar la exposición a la luz solar mediante una ubicación adecuada de los tanques o un control de la radiación incidente sobre el sistema. Sin embargo, esta estrategia debe aplicarse con precaución, ya que una mayor exposición a la luz favorece el crecimiento de algas, lo que puede alterar la calidad del agua, afectar los procesos microbiológicos y generar desequilibrios en el funcionamiento del sistema [86].

4.1.2.6. Sumidero

Los datos que se obtuvieron de OD para el sumidero son los que se muestran en la figura 10.

Figura 10.*Comportamiento de datos de OD en el sumidero*

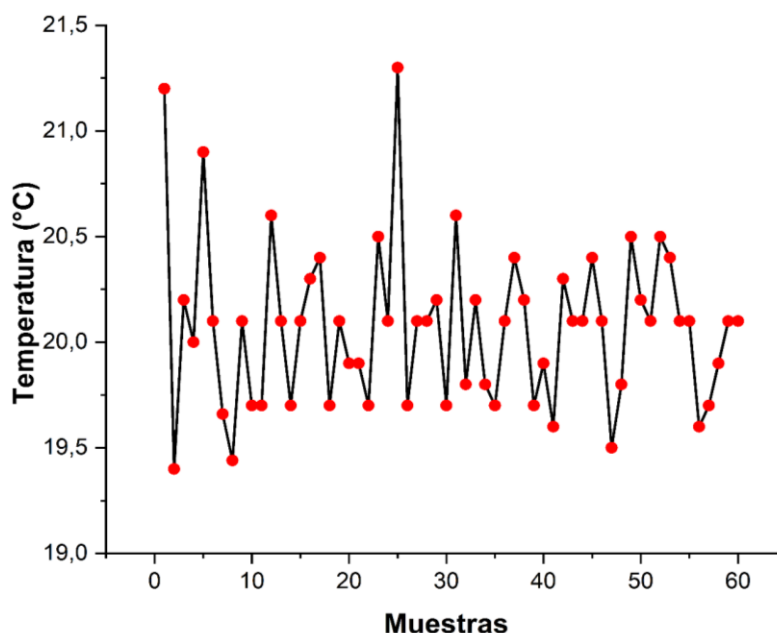
Como se observa en la Figura 10, los valores registrados en el sumidero se mantuvieron estables durante la mayor parte del período de monitoreo. No obstante, en alguno momento se presentó una disminución del oxígeno disuelto, alcanzando valores cercanos a 5,0 mg/L. Esta variación puede atribuirse a que aproximadamente la mitad del sumidero se encuentra expuesta de forma indirecta a la radiación solar, lo que favorece un incremento de la temperatura del agua, especialmente durante los días más cálidos, cuando la temperatura ambiente alcanzó alrededor de 30 °C [87].

A pesar de esta reducción, los niveles de oxígeno disuelto permanecieron dentro de los rangos aceptables para el funcionamiento del sistema, por lo que no se evidenciaron efectos negativos sobre los organismos cultivados. Asimismo, no se observaron problemas asociados al crecimiento excesivo de algas, debido a la presencia de peces carpa en el sumidero, los cuales contribuyen al control natural de estas. Adicionalmente, esta sección del sistema se utiliza como área de acondicionamiento para plántulas acuáticas adquiridas para la siembra, permitiendo que las plantas aprovechen los nutrientes disponibles en el agua antes de ser trasladadas a su ubicación definitiva dentro del sistema acuapónico [87].

El comportamiento de datos en el monitoreo de la temperatura en el sumidero se muestra en la figura 11.

Figura 11.

Variación de la temperatura en el sumidero.



La variable de temperatura registrada no evidencia fluctuaciones abruptas que comprometan la estabilidad térmica del componente evaluado ni del sistema en su conjunto (figura 11). Este comportamiento sugiere que, desde el punto de vista operativo, las condiciones térmicas se mantienen dentro de rangos aceptables para el correcto funcionamiento del sistema. También se mostró cierto nivel de dispersión en los datos obtenidos. Esta variabilidad no responde necesariamente a fallas en el sistema de medición, sino a las condiciones diferenciadas bajo las cuales se recolectaron las muestras. En particular, los datos corresponden a promedios calculados a partir de mediciones realizadas en dos sectores distintos del sumidero: uno protegido con cubierta de zinc y otro con una lámina de plástico transparente. La composición de estos materiales influye directamente en los procesos de transferencia de calor. Mientras que el zinc tiende a reflejar y disipar parcialmente la radiación solar [88], el plástico transparente favorece el efecto invernadero, permitiendo una mayor acumulación de calor [89]. Como resultado, las temperaturas en ambas zonas presentan comportamientos térmicos distintos, lo que explica la menor homogeneidad en los registros en comparación con otros componentes del sistema. Una solución a este problema es emplear una malla negra de sombra en la parte que está expuesta al sol para bajar la temperatura del agua en ese lugar, pero entonces la plantas que se siembran en esta parte crecerían más débiles ya que frenaría o minimizaría el proceso de fotosíntesis provocando un crecimiento limitado

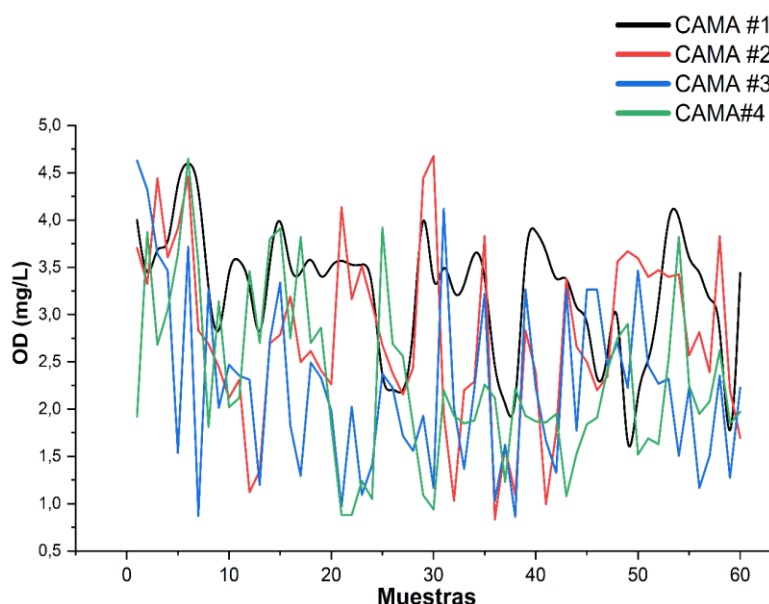
produciendo tallos débiles y pálidos, hojas amarillentas formando así una planta débil sin desarrollo en su mayoría de frutos [90].

4.1.2.7. Sifones.

Los resultados del OD en las camas de sustrato, como se observa en la figura 12, fueron variables. Esta dispersión en los datos se debe principalmente a las condiciones particulares del punto de muestreo, donde se evidenció una alta proliferación de algas, una lámina de agua superficial de baja profundidad y una velocidad de flujo relativamente baja.

Figura 12.

Comportamiento del OD en sifones en el sistema acuapónico



Las condiciones anteriores generan un entorno poco favorable para la adecuada oxigenación del agua, ya que la presencia de algas incrementa la actividad biológica y el consumo de oxígeno, especialmente durante ciertos periodos del día [91]. Asimismo, el bajo volumen de agua y la limitada circulación reducen la capacidad de renovación del OD, lo que se traduce en mediciones que, en varios casos, se encuentran por debajo de los valores recomendados.

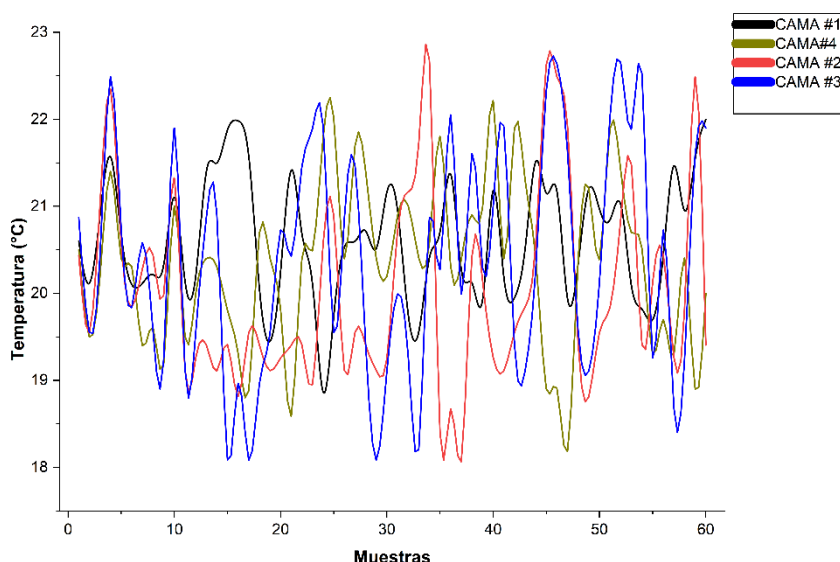
Es importante destacar que el agua proveniente de esta sección del sistema se encuentra expuesta a factores ambientales como el calor y la radiación solar indirecta, los cuales influyen directamente en la dinámica del OD, favoreciendo su disminución [92]. Posteriormente, esta agua

es reincorporada al sistema de recirculación, lo que puede afectar de manera acumulativa las condiciones generales del sistema si no se controla adecuadamente.

Los datos obtenidos de temperatura para los sifones se muestran en la figura 13, la cual reporta sus variaciones durante el proceso de muestreo.

Figura 13.

Comportamiento de temperatura en sifones en el sistema acuapónico



En la figura 13 se observa que varios de los valores registrados superan el límite permisible establecido para la temperatura del agua ($>21^{\circ}\text{C}$), lo cual pone en evidencia un comportamiento térmico fuera de los rangos adecuados para el sistema. Esta situación se da por las condiciones del área evaluada, ya que se trata de una zona directamente influenciada por factores ambientales como la exposición al calor y a la radiación solar [93]. La incidencia de la luz solar, incluso de manera indirecta, genera un incremento progresivo de la temperatura del agua, especialmente cuando se combina con volúmenes reducidos. En este caso, la presencia de una lámina de agua de escasa profundidad favorece un calentamiento más rápido, debido a que existe una menor masa de agua capaz de amortiguar las variaciones térmicas [94]. Como resultado, el sistema se vuelve altamente susceptible a cambios climáticos externos, dependiendo en gran medida de variables como la intensidad de la radiación, la temperatura ambiente y las condiciones meteorológicas del momento. Para mitigar este problema, se implementó el uso de tapones de PVC con un diámetro similar al de las tuberías, con el objetivo de reducir la exposición directa del agua y contribuir a la

conservación de una temperatura más baja dentro del sistema. No obstante, esta solución presentó limitaciones importantes en su efectividad, debido a la dinámica de recirculación del agua.

Con base en los resultados obtenidos, se identificó que el pH y la temperatura son los parámetros fisicoquímicos más sensibles dentro del sistema acuapónico, debido a que influyen directamente en los procesos biológicos, químicos y productivos. El pH regula la actividad de las BN, la disponibilidad de nutrientes para las plantas y el bienestar de los peces. Por esta razón, variaciones fuera de los rangos adecuados pueden disminuir la conversión de NH_4^+ a NO_3^- , favorecer la acumulación de compuestos tóxicos y afectar tanto el crecimiento vegetal como la salud de los organismos acuáticos.

La temperatura también desempeña un papel fundamental, ya que condiciona el crecimiento de la trucha arcoíris, la disponibilidad de oxígeno disuelto y la actividad de las bacterias nitrificantes. Temperaturas elevadas pueden generar estrés en los peces, aumentar su demanda de oxígeno y favorecer la acumulación de compuestos tóxicos en el agua. Por el contrario, temperaturas bajas ralentizan el metabolismo de los peces y la actividad bacteriana, reduciendo el crecimiento de los organismos y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Durante la fase I se observó que el sistema operó de forma adecuada en términos generales; sin embargo, presentó fluctuaciones en variables como pH, NO_2^- , NO_3^- , conductividad, OD y temperatura, evidenciando un equilibrio biológico aún inestable. Entre las principales problemáticas identificadas se encuentran los descensos de pH asociados a la acumulación de materia orgánica, episodios de concentración elevada de NO_2^- que ocasionaron estrés y mortalidad en algunos peces, y variaciones en la disponibilidad de nutrientes que afectaron el desempeño de los cultivos. Asimismo, se detectaron condiciones localizadas como disminuciones del OD, incrementos de temperatura y proliferación de algas en zonas con mayor exposición solar o baja circulación de agua, lo que pone en evidencia algunas limitaciones del diseño hidráulico y estructural del sistema. Por ello, para el desarrollo de un sistema acuapónico unifamiliar resulta prioritario corregir estos aspectos, garantizando una operación más estable, eficiente y sostenible. Dicho lo anterior se presentan las siguientes problemáticas:

Optimización estructural del sistema: Se plantea la necesidad de realizar un rediseño de la estructura, orientado a mejorar el aprovechamiento del espacio disponible. Esto implica desarrollar una configuración más compacta, funcional y adaptable a entornos residenciales, sin

comprometer el correcto funcionamiento de los componentes ni el bienestar de las especies involucradas. Asimismo, se busca facilitar las labores de mantenimiento y operación, contribuyendo a una mayor practicidad para el usuario.

Eficiencia energética del sistema: Se considera indispensable identificar e implementar alternativas que permitan reducir el consumo energético asociado principalmente a las bombas de circulación y a los sistemas de aireación del agua. En este sentido, se sugiere evaluar el uso de tecnologías de bajo consumo, energías renovables o ajustes en los ciclos de funcionamiento, con el propósito de disminuir los costos operativos y promover un sistema más sostenible desde el punto de vista ambiental y económico.

Para lo anterior se realizará una búsqueda de alternativas que ayuden a solventar estas problemáticas y que aporten una reducción en los gastos de operación y mantenimiento.

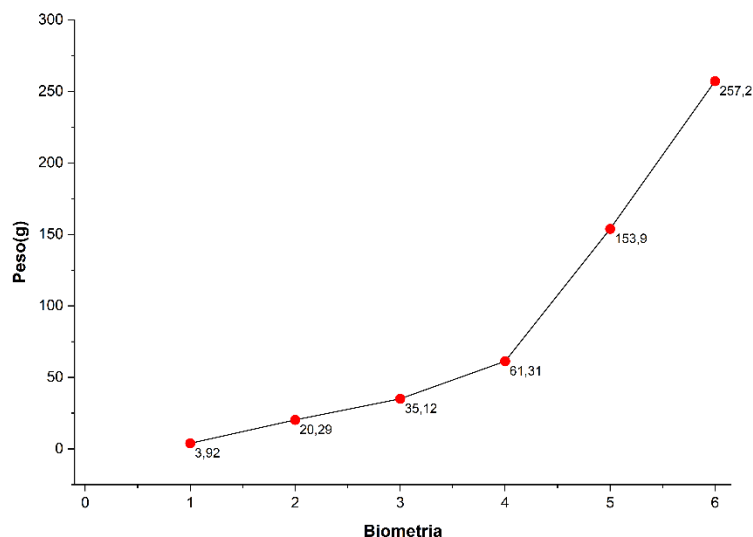
4.2. Fase II Evaluación del desarrollo de peces y plantas.

4.2.1. Actividad 1. Curva de crecimiento de los peces

Después de la recopilación de todos los datos sobre biometría para cada tanque que fueron tabulados y conservados en el anexo B, se realizó la curva de crecimiento, esta brindará o determinará con mayor precisión el tiempo en el cual los peces alcancen su peso adecuado para el consumo, para estas biometrías se toma que el peso es igual al tamaño, si la variable peso ya está en el rango de consumo o venta quiere decir también que está bien de tamaño. Para la curva de crecimiento se utilizó la curva de crecimiento de Gompertz, ya que este modelo muestra que en cuanto tiempo se demora una especie para llegar a su tamaño de crecimiento ideal como se muestra en la figura 14 [95].

Figura 14.

Curva de crecimiento para los peces en el sistema acuapónico.



En la interpretación de los resultados en la figura 14, se evidenció que la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) requiere un periodo de engorde considerablemente mayor al inicialmente previsto para alcanzar el peso comercial óptimo de aproximadamente 350 g. Aunque se había estimado un ciclo productivo cercano a los cuatro meses, los datos obtenidos indican que, bajo las condiciones reales del sistema, este proceso puede extenderse hasta seis meses o incluso más.

Este comportamiento pone en evidencia que, a pesar de contar con condiciones aparentemente favorables como el suministro de alimento balanceado, el mantenimiento de parámetros fisicoquímicos del agua dentro de rangos aceptables y la implementación de monitoreos constantes, existen factores adicionales que influyen directamente en la tasa de crecimiento de los organismos. Entre estos factores se pueden destacar las variaciones ambientales, las condiciones térmicas del sistema, la densidad de siembra, y las características fisiológicas propias de la especie, las cuales determinan su metabolismo y eficiencia en la conversión alimenticia [96] [97].

Es importante reconocer que la trucha arcoíris es sensible a cambios en su entorno, particularmente a la temperatura del agua, la disponibilidad de OD y la calidad general del sistema. Incluso pequeñas fluctuaciones en estos parámetros pueden traducirse en cambios significativos en la tasa de crecimiento, lo que explica en parte la extensión del periodo de engorde observado

[50], [98] . Asimismo, el estrés asociado a condiciones subóptimas, aunque no críticas, puede ralentizar los procesos metabólicos y reducir la eficiencia productiva [97].

Estos resultados son relevantes para la planificación y gestión del sistema productivo, ya que implica la necesidad de ajustar los tiempos de cosecha, la programación de ciclos y la administración de recursos. Una subestimación del tiempo requerido para alcanzar el peso deseado puede generar impactos negativos en la productividad, el flujo económico y la sostenibilidad del sistema.

4.2.2. Actividad 2. Seguimiento del desarrollo de los cultivos.

La evaluación de los cultivos hortícolas se llevó a cabo durante un período de tres meses mediante observaciones periódicas de las plantas. Durante este tiempo se registraron características cualitativas relacionadas con el estado de raíces, tallos, hojas y frutos, con el fin de identificar posibles anomalías o cambios fisiológicos asociados a las condiciones de cultivo dentro del sistema acuapónico, los datos anteriores se conservan en el anexo C.

Para todo lo anterior se generó un formato de evaluación para la calidad y salud en las plantas en las diferentes partes morfológicas de estas basándose en formatos hechos en otros trabajos de investigación [99] [100] [101]. Los datos se tomaron de manera escrita dos veces al día, específicamente una vez en la mañana y una vez en la tarde. Los criterios de evaluación se muestran en la tabla 11.

Tabla 10.

Formato de evaluación para calidad y salud en plantas del sistema

Parte morfológica	Bueno (1)	Regular (2)	Malo (3)
Raíz	Blancas, abundantes, sanas	Crecimiento limitado	Oscuras, con mal olor o pudrición
Tallo	Firme y recto	Ligera debilidad	Quebradizo o dañado

Hojas	Verdes, firmes, sin daños	Ligeras manchas o deformaciones	Amarillas, secas o caídas
Fruto	Uniformes, sanos	Irregulares, leves cicatrices	Deformes, dañados o caídos

Para cada una de las plantas cultivadas se realizó un análisis basándose en los datos obtenidos utilizando el formato de evaluación de calidad y salud en las plantas que muestra que tipo de alteraciones, problemáticas o situaciones se presentaron durante el proceso de desarrollo de cada una de las plantas.

4.2.2.1. Tomate purro.

La primera planta en analizarse fue el tomate puerro, planta que necesita de enrutado para no quedar suspendida en el suelo y así asegurar más posibilidades de que el fruto se genere y no sufra alguna calamidad con vectores externos como animales terrestres que hallen en ella una base de alimento [102].

En su raíz no se presentó ninguna afectación ya que siempre se notó una planta con buena base en el suelo (grava) que tomaba los nutrientes que se encontraban en este, en su tallo se presentaron larvas durante unos días las cuales devoraron parte de ramas secundarias y tallo principal lo anterior sucedió ya que se presentaron problemas con el plástico que aislaba la parte de siembra del sistema acuapónico.

Durante algunos muestreos se presentaron coloraciones amarillentas en las hojas que tenían más edad, esto sucedió por falta de nutrientes en especial el nitrógeno[103] . Lo cual género que se limpiara a las plantas que presentaran hojas con este color y volviera a formular la cantidad de alimento para los peces, limpieza del filtro y cantidad de BN en el sistema con el fin de equilibrar la cantidad de nutrientes. Los frutos presentaron cicatrices en su forma ya que algunos de estos estuvieron expuestos a animales que se alimentan de estos frutos.

4.2.2.2. Acelga.

Esta hortaliza al ser evaluada presentó un desarrollo morfológico y fisiológico favorable a lo largo de su ciclo de crecimiento, evidenciando una notable ausencia de estrés biótico y abiótico. En lo que respecta a sus raíces, no se observaron anomalías estructurales, necrosis, ni restricciones

en su expansión, lo cual sugiere una adecuada disponibilidad de OD y nutrientes en el medio de cultivo [104]. Este comportamiento indica una correcta funcionalidad en los procesos de absorción hídrica y mineral.

El tallo se caracterizó por mantener una morfología robusta y consistente, con un grosor uniforme. No se evidenciaron signos de debilitamiento estructural ni afectaciones producidas por agentes fitopatógenos o plagas, lo que sugiere condiciones sanitarias óptimas dentro del sistema de cultivo. Asimismo, la ausencia de perforaciones o lesiones externas evidencia que es un entorno controlado con baja presión de organismos perjudiciales.

En cuanto al follaje, las hojas presentaron una coloración normal, acorde a la especie, sin manifestaciones de clorosis, necrosis, ni síntomas asociados a deficiencias nutricionales específicas (como nitrógeno, hierro o magnesio) [105]. Tampoco se detectaron indicios de herbivoría, tales como bordes irregulares, perforaciones o pérdida de tejido foliar.

4.2.2.3. Pimentón.

Durante el periodo de evaluación, las raíces se notaron en condiciones óptimas, sin evidenciar daños visibles ni indicios de pudrición o restricciones en su crecimiento. Este comportamiento muestra que la cama de siembra ofreció un entorno adecuado. Como resultado, las raíces pudieron desarrollarse de manera equilibrada y eficiente, asegurando un crecimiento óptimo de la planta.

Sin embargo, a nivel del tallo se identificaron afectaciones significativas asociadas a la incidencia de una plaga específica: pulgones (áfidos). Estos organismos fitófagos ejercieron presión directa sobre los tejidos del tallo mediante la succión de savia, lo que derivó en un debilitamiento estructural progresivo. Como consecuencia, se observaron lesiones visibles, pérdida de turgencia y la aparición de manchas oscuras o necróticas, indicativas tanto del daño directo como de posibles infecciones secundarias favorecidas por las heridas [106]. Este tipo de afectación compromete no solo la resistencia física del tallo, sino también la eficiencia en el transporte de nutrientes dentro de la planta [107].

La presencia de pulgones generó, además, un impacto negativo sobre el desarrollo foliar. Las hojas presentaron deformaciones, crecimiento irregular y alteraciones en su morfología, lo cual es característico de estos insectos al inyectar sustancias durante su alimentación que interfieren en los procesos normales de división y expansión celular [108]. Se evidenció una pérdida considerable de tejido foliar, superando el 50% de la superficie de algunas hojas, lo que

condujo a su deterioro funcional. Asimismo, se registraron síntomas de marchitez, asociados tanto a la extracción constante de savia por parte de la plaga como a la disminución de la capacidad fotosintética.

Ante esta afectación se hizo necesaria la implementación de medidas de control, ejecutando la realización de una jornada de fumigación dirigida específicamente al control de pulgones. Esta intervención resultó fundamental para reducir la carga poblacional de la plaga y mitigar los daños progresivos en la planta. No obstante, el daño ya establecido en algunos órganos vegetativos condujo a la eliminación de estructuras comprometidas, principalmente hojas que ya no presentaban viabilidad funcional.

4.2.2.4. Cebolla china (cebollín).

. La cebolla china necesita de superficie sólida para ser sembrada, por eso es cultivada en camas de siembra, mostró un comportamiento diferencial durante su evaluación, particularmente favorable en cuanto a su desarrollo. A lo largo del periodo de análisis, no se identificaron afectaciones visibles en las raíces ni manifestaciones negativas con relación a su cuerpo vegetal

Sin embargo, a nivel del tallo se identificaron afectaciones significativas asociadas a la incidencia de una plaga específica, los pulgones [57]. Estos organismos fitófagos ejercían presión directa sobre el tejido del tallo succionando la savia, provocando un paulatino debilitamiento de la estructura. Como consecuencia, se observaron lesiones visibles, pérdida de turgencia y la aparición de manchas oscuras o necróticas, indicativas tanto del daño directo como de posibles infecciones secundarias favorecidas por las heridas [57]. La presencia de pulgones generó, además, un impacto negativo sobre el desarrollo foliar. Las hojas presentaron deformaciones, crecimiento irregular y alteraciones en su morfología, lo anterior gracias a la extracción de savia del cuerpo vegetal, por lo tanto, se tomó como medida una jornada de fumigación con jabón potásico dirigida específicamente al control de pulgones para mitigar y controlar esta afectación producida por esta plaga.

4.2.2.5. Lechuga.

Esta especie hortícola destaca por su precocidad productiva, lo que la convierte en una alternativa estratégica dentro de sistemas intensivos, ya que alcanza su punto de cosecha en un periodo considerablemente reducido [109]. Su cultivo se desarrolló bajo la técnica NFT en estructuras piramidales, un método que optimiza el flujo continuo de la solución nutritiva y

promueve una adecuada oxigenación [110], lo anterior son factores determinantes para su rápido establecimiento y crecimiento. A lo largo del seguimiento, tanto las raíces como el tallo mantuvieron un comportamiento estable y sin anomalías. Las raíces se desarrollaron de forma limpia y uniforme, sin indicios de estrés, enfermedades o limitaciones en su funcionamiento. Del mismo modo, el tallo conservó su integridad estructural, sin presentar debilitamiento ni síntomas asociados a factores adversos. Sin embargo, el componente foliar fue el más afectado durante el proceso. Se evidenció un daño significativo en las hojas, caracterizado por perforaciones amplias y pérdida de grandes secciones del tejido vegetal. Este deterioro estuvo directamente relacionado con la presencia de pulgones, cuya actividad alimenticia no solo implicó la extracción de savia, sino también la destrucción mecánica del tejido foliar [106]. Como consecuencia, se redujo la superficie foliar limitando la capacidad para realizar fotosíntesis, afectando la eficiencia metabólica de la planta. Para contrarrestar esta problemática, se implementó un control mediante la aplicación de jabón potásico, un insumo compatible con prácticas de manejo sostenible. Este tratamiento actuó de manera directa sobre la plaga, debilitando su capacidad de adherencia y alimentación, lo que permitió contener su proliferación sin generar impactos negativos en el sistema.

Durante la fase II se evidenció que el sistema acuapónico permite el desarrollo tanto de peces como de cultivos, pero con limitaciones que afectan su eficiencia productiva. En el caso de los peces, el crecimiento fue más lento de lo esperado, lo que indica que, aunque las condiciones generales son aceptables, factores como el manejo, el ambiente y el estrés influyen directamente en su desarrollo.

Por su parte, los cultivos mostraron un comportamiento variable: algunas especies se adaptaron bien, mientras que otras presentaron problemas como deficiencias nutricionales y presencia de plagas, principalmente en las hojas. Esto evidencia que el sistema no mantiene un equilibrio completamente estable en la distribución de nutrientes ni en el control sanitario.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que es prioritario implementar medidas orientadas a garantizar el adecuado cuidado y protección de los peces y las plantas frente a factores externos que puedan afectar el equilibrio del sistema. En este sentido, resulta fundamental controlar aquellas variables ambientales y agentes externos que incidan de manera negativa en su desarrollo y bienestar. También se identifica como un aspecto crítico la necesidad de reducir y gestionar eficazmente la presencia de plagas, dado que estas representan un riesgo significativo para la

integridad tanto de las especies vegetales como de las acuáticas. Por lo tanto, se recomienda diseñar e implementar estrategias preventivas y correctivas que permitan minimizar su impacto, asegurando así la sostenibilidad y estabilidad del sistema en su conjunto.

Para esto es importante realizar una búsqueda de información para hallar alternativas que den una solución permanente a estos problemas.

4.3. FASE III: Plantear un sistema acuapónico unifamiliar eficiente y de bajo costo.

4.3.1. Actividad 1. Identificar la necesidad del sistema

A partir de los resultados obtenidos en las fases I y II, se identificaron las principales necesidades del sistema. Entre ellas destacan el elevado consumo energético asociado a las bombas de recirculación y aireación, así como la gran superficie requerida para la implementación del sistema a escala completa. Con base en estos hallazgos, se llevó a cabo una revisión bibliográfica orientada a identificar alternativas tecnológicas que contribuyan a mitigar estas problemáticas y reducir los impactos asociados a su operación.

4.3.1.1. Búsqueda Bibliográfica.

Se realizó una búsqueda bibliográfica para cada uno de los problemas identificados en las anteriores fases para buscar alternativas eficientes y sostenibles para usarla en el diseño del sistema unifamiliar.

Para la búsqueda de artículos que correspondan con las problemáticas que presenta el sistema acuapónico se utilizaron prompts, para cada una de las problemáticas halladas se generó una indicación diferente como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11

Prompt utilizado para cada uno de los problemas presentes en el sistema

Problema	Prompt
Aireación	Which sustainable aeration methods have experimentally demonstrated the highest energy efficiency in small-scale (single-family) aquaponic systems compared to conventional mechanical aeration systems?

Recirculación	Which low-cost and sustainable water recirculation methods have experimentally demonstrated the highest energy efficiency in small-scale (single-family) aquaponic systems compared to conventional continuous pumping systems?
Estructura	What low-cost and easy-to-build structural designs for small-scale (single-family) aquaponic systems, whether vertical or horizontal, have been experimentally evaluated?

El número de resultados y la metodología para selección de alternativas para mejorar el diseño del sistema acuapónico unifamiliar es igual para las tres búsquedas que se realizaron ya que para cada uno se empezó con una búsqueda rigurosa y sistemática en una base de datos compuesta por más de 170 millones de artículos científicos. A partir de esta revisión inicial se obtuvieron 3,456,567 artículos que se relacionaban con el tema a tratar de manera general, se identificaron 368 308 estudios potencialmente relevantes. Posteriormente, se realizó un proceso de selección detallado, en el cual se escogieron 240 artículos para analizar su pertinencia en torno a la comparación experimental entre sistemas de aireación sostenible y convencional en contextos acuapónicos o acuícolas de tipo doméstico o a pequeña escala. Tras su evaluación y aplicando los criterios de elegibilidad, se determinó que 113 estudios cumplían con los requisitos que se establecieron en la tabla 1. Finalmente, se seleccionaron los 50 artículos más relevantes y representativos a la investigación, los cuales constituyen los documentos para analizar sobre los problemas de consumo de energía por aireación, recirculación y el costo por la construcción a pequeña escala. A partir de esa recopilación de datos, se realiza un análisis orientado a comprender no solo la diversidad de alternativas encontradas, sino también su nivel de aplicabilidad.

Por lo tanto se le da una escala de valoración a las alternativas encontradas y es de 1-4, siendo 4 (evidencia alta) la mayor mostrando que hay variedad de investigaciones que producen el mismo resultado), 3 (evidencia moderada) es para estudios que llevan a varios resultados no confiables por falta de fundamentación, 2 (evidencia baja) es para investigaciones que proporcionan variedad de conclusiones, 1 (evidencia insuficiente) es para esa información resultante que es contradictoria y 0 (brecha o laguna de conocimiento) para cuando no hay existencia de estudios experimentales. Lo anterior se muestra en la tabla 12,13 y 14 para identificar cual de todas es la opción a utilizar.

Las tecnologías principales que permiten en una medida dar solución para reducir el consumo energético por bombas de aireación son las siguientes:

1. Aireadores hidráulicos de tipo cascada (PPCSC)
2. Aireación con microburbujas Venturi/Venturi-Vortex
3. Aireación con micro/nano burbujas
4. Enfoques pasivos/híbridos e integración energética

Los Aireadores hidráulicos de tipo cascada (PPCSC) y Aireación con microburbujas Venturi/Venturi-Vortex muestran mayor efectividad ya que aprovecha la gravedad y su dinámica hidráulica reduciendo el monitoreo y costos de operación, reduciendo los costos por consumo y manejo del sistema, además alcanzo una transferencia de oxígeno (SAE) al agua de 4,56 kg O₂/kWh sobrepasando los índices de tecnologías convencionales como ruedas de paleta, dando un porcentaje de aumento entre el 25-69% siendo así una alternativa prometedora tanto para sistemas acuícolas como acuapónicos a pequeña escala [111]. La aireación con microburbujas Venturi/Venturi-Vortex mostro resultados favorables partiendo de que el generador Venturi Vortex tuvo mayor eficiencia al mostrar una velocidad de transferencia de oxígeno al agua de 1,7g de O₂/h y una SAE de 6,5g O₂/kWh, superando al sistema Venturi convencional debido a una mayor producción de microburbujas y una mejor transferencia de oxígeno para el sistema donde se empleó. Otra tecnología que se identificó a causa de la investigación fue la aireación por microburbujas y nano burbujas, teniendo una efectividad alta para solucionar esta problemática, la aireación mediante micro y nano burbujas (MNB) permite lograr una transferencia de oxígeno significativamente más eficiente en comparación con los sistemas convencionales, ya que estos utilizan burbujas gruesas o finas [112] y pueden alcanzar eficiencias de SAE de hasta un 54 %, lo que representa cerca del doble en comparación con los métodos tradicionales, que usualmente se sitúan entre el 5 % y el 20 % [113]. Además, los modelos indican que, con tamaños de burbujas óptimos es posible aprovechar casi por completo el oxígeno[112]. Otra alternativa son los dispositivos con enfoque pasivos/híbridos e integración energética, estos son láminas de corte de burbujas que mejoran la transferencia de oxígeno-agua mediante el corte de burbujas haciéndolas más pequeñas aprovechando la fricción y turbulencia del agua, algunos estudios han demostrado que es posible integrar de manera efectiva bombas impulsadas por energía solar con aireadores

mecánicos simples o de tipo cascada, lo que permite su operación en sistemas acuapónicos a pequeña escala sin necesidad de conexión a la red eléctrica [114].

Consensus también muestra una matriz en la cual se evidencia si hay lagunas de conocimiento para las tecnologías relevantes encontradas en los resultados, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12

Matriz de resultados de las tecnologías para aireación.

Tema/ resultado	Aireador		Microburbujas/nano burbujas	Integración solar
	Cascade/PPCSC	Venturi/microburbuja		
Eficiencia energética	4	3	4	2
Análisis de datos	2	2	2	1
Ensayos de campo	0	0	0	0

La tabla 13 muestra que tanta evidencia hay para cada una de las alternativas que se obtuvieron en la búsqueda bibliográfica. Por lo tanto, identifica que tan sólida es la evidencia (confiable y bien fundamentada) que hay por cada tipo de tecnología demostrando que, si hay resultados para la eficiencia energética, análisis de datos y ensayos en campo.

Para la búsqueda de artículos que correspondan con la problemática de alto consumo energético por acción de bombas para la circulación del agua que presenta el sistema a gran escala se utilizó el prompt que se muestra en la tabla 11. Las tecnologías principales encontradas para analizar son las siguientes:

1. Recirculación híbrida alimentada por gravedad y energía solar
2. Bombeo intermitente/de caudal variable y optimización mediante IoT
3. Tecnología de biofloc (BFT) y humedales artificiales
4. Diseños de sistemas circulares y desacoplados

La recirculación híbrida alimentada por gravedad o energía solar demuestra que los sistemas acuapónicos a pequeña escala que funcionan por gravedad con ayuda de bombas que son alimentadas por energía fotovoltaica reducen significativamente el consumo de energía eléctrica [115] [116] en un 27% en comparación con los sistemas tradicionales [117]. Otro resultado similar lo da el bombeo intermitente/ de caudal variable y optimización ya que utilizan controles basados en aprendizaje automático o IoT que pueden ajustar la dinámica del agua acorde a la necesidad del sistema [118], reduciendo el tiempo innecesario en el cual la bomba puede funcionar, de mismo modo se reduce el consumo energético externo, volviéndose una alternativa viable [119]. Por otro lado, la tecnología de biofloc (BFT) y humedales artificiales muestra una reducción en la reposición del agua en un 90% y su recirculación del agua depende de la acción de O₂ inyectado para generar una corriente de agua que exceda la altura del tanque de almacenamiento para caer por acción de la gravedad a el tanque de almacenamiento para volver a ser circulada por todo el sistema [120]. Los diseños de sistemas circulares y desacoplados es otra tecnología que no son tan comúnmente utilizada, por lo cual las personas prefieren sistemas acuapónicos acoplados por su fácil manejo y simplicidad, no obstante, esta alternativa ofrece una actividad del sistema más flexible, ya que permiten gestionar de manera independiente los componentes de peces y plantas, lo que puede traducirse en una mejor optimización del sistema y posibles incrementos en la eficiencia. Reduciendo altamente la tasa de recambio de agua al mismo tiempo que se puede personalizar como viaja el agua por el sistema [121].

La tabla 13 presenta el nivel de solidez de la evidencia disponible para cada tipo de tecnología, considerando qué tan confiables y bien sustentados son los resultados obtenidos en términos de eficiencia energética, análisis de datos y ensayos en campo

Tabla 13.

Resultados de las tecnologías para recirculación.

Tema/ resultado	Recirculación híbrida alimentada por gravedad y energía solar	Bombeo intermitente/ de caudal variable y optimización mediante IoT	Tecnología de biofloc (BFT) y humedales artificiales	Diseños de sistemas circulares y desacoplado s
Eficiencia energética	4	4	4	3

Análisis de datos	2	2	2	2
Ensayos de campo	0	0	0	0

Para la búsqueda de artículos que correspondan con la problemática de rediseño del sistema acuapónico en una escala pequeña (unifamiliar) se utilizó el prompt que se muestra en la tabla 11. Se evidencia esta pregunta no es similar a las demás ya que contiene un tema diferente y se esperan resultados que sean apropiados para el diseño en un espacio pequeño del hogar. Los 4 resultados importantes fueron:

1. Estructuras hidropónicas/acuapónicos verticales modulares
2. Hidroponía vertical simplificada sin invernadero (método Kratky)
3. Acuaponía multitrófica integrada (IMTA) con estructuras de invernadero sencillas
4. Sistemas de islas flotantes y basados en cubos

Las estructuras hidropónicas/acuapónicos verticales modulares han utilizado estructuras multiniveles de altura ajustable, con utilización para interiores o exteriores. Uno de los prototipos utilizó hierro galvanizado para su estructura, se recomendó emplear materiales ligeros como PVC o aluminio para reducir costos, también permitió aumentar considerablemente la cantidad de plantas por metro cuadrado, llegando a triplicar la densidad en comparación con los métodos tradicionales. Además, se caracterizó por ser práctico y fácil de usar, ya que se pudo instalar, manejar y cosechar sin mayor complejidad, y también adaptarse con facilidad a distintos tipos de cultivos. Con lo anterior se dedujo que el sistema se podía adaptar a jardines o balcones domésticos [122]. Otra tecnología parecida es la hidroponía vertical simplificada sin invernadero (método Kratky), la cual consiste en un sistema pasivo y no circulante donde las plantas toman los nutrientes en una película nutritiva sin bombas, aireadores y electricidad esta tecnología permitió cultivar 60 hortalizas en un espacio reducido 6m^2 y en condiciones ambientales no controladas [123]. Para la acuaponía multitrofica integrada (IMTA) con estructuras de invernaderos sencillas los resultados después de su ejecución experimental se obtuvo que el sistema utilizaba materiales de bajo costo utilizados principalmente en la fontanería (tuberías PVC), para el no crecimiento de algas los tanques fueron revestidos con plástico negro, de igual manera el agua antes de llegar a los cultivos

hidropónicos tuvo que pasar por varios componentes ya que en esta tecnología se incorporan varias especies de animales acuáticos de consumo[114]. En los sistemas de islas flotantes basados en cubos se diseñó un sistema acuapónico modular en forma de cubos, alimentado mediante energía solar, que incorporaba islas flotantes construidas con tuberías de PVC. Estas estructuras fueron el soporte para macetas que contenían materiales como piedra o espuma esponjosa, utilizados como sustrato para el desarrollo de las plantas, ofreciendo una solución práctica y adaptable para este tipo de cultivo, el agua era transportada por una pequeña bomba alimentada por un panel solar, este diseño permitió el cultivo de peces y plantas en espacios reducidos como patios de casas [124]

La estructura de esta matriz es diferente a las demás ya que el tema principal es diferente a los 2 problemas anteriores mostrados en la tabla 12, lo que provoca que los criterios de evaluación sean diferentes. La tabla 14 presenta el nivel de solidez de la evidencia disponible para cada tipo de tecnología. considerando qué tan confiables y bien sustentados son los resultados obtenidos en términos de eficiencia energética, análisis de datos y ensayos en campo.

Tabla 14

Resultados para el diseño del sistema acuapónico unifamiliar.

Tema/ resultado	Estructuras verticales modulares	Kratky vertical	Invernadero simple (IMTA)	Sistemas de islas flotantes y basados en cubos
Eficiencia de la prueba piloto	3	2	2	3
Validación en campo	1	1	0	1
Análisis de costo	0	0	0	1

4.3.2. Actividad 3. Análisis de costo/beneficio.

De acuerdo a la fase III se analizó el costo/beneficio de cada una de las tecnologías seleccionada comparándola con los dispositivos utilizados en el sistema a gran escala, para esto se utilizó una matriz de semáforo, la cual consta de darle valores cuantitativos a resultados cualitativos y darle un respectivo color haciendo referencia a la relación que tiene el costo y beneficio [125].

Para cada uno de los problemas (aireación, recirculación de agua y estructura) que presento el sistema se identificó y escogió una tecnología que sea de bajo costo, eficiente y fácil de utilizar. Se genero una matriz basada en estudios anteriores [125] para hallar el valor y la relación costo beneficio realizando una comparación entre componentes del sistema a gran escala con las tecnologías encontradas en la búsqueda bibliográfica, esta metodología se utilizó para evaluar cada una de ellas.

La aireación y recirculación del agua en el sistema acuapónico tiene en común que su problemática es el consumo de energía eléctrica por parte de bombas mecánicas que actúan por acción de la electricidad, para la estructura del sistema a pequeña escala utilizado en el diseño su problema tiene como énfasis el alto costo de su estructura para soporte de todos los componentes. Para cada una de las anteriores se estableció una solución como se muestra en la tabla 15,16 y 17.

Tabla 15

Relación costo beneficio para tecnología de aireación

Tecnología	Descripción	Costo	Valor de relación costo/beneficio	Relación costo/beneficio
Aireador tipo Blower de 1 HP referencia HG 750 C2 Agrair	Capacidad de oxigenación de 3,29 kg de O ₂ , que ofrece alta eficiencia energética en comparación con otros aireadores mecánicos. Sin embargo, aún implica un consumo energético elevado, representando un costo operativo significativo.	1.490.000\$	0,08	No recomendable

Aireación con microburbujas (Dispositivo Venturi casero)	Sistema elaborado con PVC hidráulico (T de ¾", reducciones y tubo), sellado con plastilina epóxica. Aprovecha la gravedad, lo que reduce costos de operación y manejo, y logra una eficiencia de 4,56 kg O ₂ /kWh en la oxigenación del agua.	45.000\$	5,0	Muy favorable
--	--	----------	-----	---------------

En la tabla 17 se evidencia que la aireación con un dispositivo Venturi casero, hecho en PVC es muy favorable ya que obtuvo un valor de 5,0 por lo cual obtiene el color verde.

Tabla 16.

Relación costo-beneficio para tecnología de recirculación.

Tecnología	Descripción	Costo	Valor de relación costo/beneficio	Relación costo/beneficio
2 electrobombas Centrifuga 3 Hp Alto Caudal 220/440 V Trifásica Pedrollo Modelo HF70A	Electrobomba fabricada en hierro fundido con tratamiento de cataforesis, lo que le brinda gran durabilidad y resistencia. Integra un motor de cobre clase IE3, con impulsor en latón y eje en acero inoxidable, permitiendo trabajar de forma continua hasta 24 horas. Opera en 220 y 440 V trifásicos, con un caudal máximo de 300 L/min, altura de 39 m y conexiones de 1 ½ pulgadas, siendo una alternativa confiable y versátil para el manejo de agua.	\$ 5.783.800	0,07	No recomendable

Kit Bomba Agua Solar Altura 2.3 Mt 3.000L/día	Kit solar con panel y bomba sumergible sin escobillas, ideal para recirculación y suministro de agua en usos pequeños como estanques de peces. Opera hasta 15 horas y puede bombear aproximadamente 3000 litros al día, siendo práctico para necesidades básicas de agua a pequeña escala.	\$ 470.000	5,0	Muy favorable
--	--	------------	-----	---------------

La Tabla 18 evidencia que la matriz asigna un valor de 5,0 a la tecnología propuesta para la recirculación de agua en el sistema acuapónico unifamiliar. Esta alternativa fue seleccionada por su facilidad de implementación, ya que adquirir los componentes por separado incrementaría significativamente el costo total. Sin embargo, el costo de esta tecnología es muy asequible y bajo a comparación de lo convencional.

Tabla 17

Relación costo beneficio sobre estructura del sistema acuapónico unifamiliar.

Tecnología	Descripción	Costo	Valor de relación costo/ beneficio	Relación costo/beneficio
Estructura del sistema acuapónico a gran escala en la asociación frutos del campo, en la vereda el placer, Popayan-Cauca	El costo estimado de la estructura en guadua y sin piso para el sistema acuapónico (con tanques, camas y NFT incluidos) es de \$15.700.000 COP, distribuidos principalmente entre el invernadero, soportes, camas de cultivo, pirámides NFT, tanques y la nivelación del terreno.	\$ 15.700.000	0,8	No recomendable

Estructuras verticales modulares (Se escogió una estructura vertical a pequeña escala)	• Tanque de peces (880L): \$500.000				Muy favorable
	• Biofiltro: \$250.000				
	• Tanque para plantas(1m²): \$300.000	\$ 2.550.000	5,0		
	• Estructura vertical(aluminio): \$1.300.000				
	• Refuerzos y accesorios: \$200.000				

Al ser un proyecto el valor monetario del sistema a gran escala se maneja de manera confidencial, para este sistema se hizo una suposición del valor teniendo en cuenta cada uno de los componentes.

4.3.2.1. Retorno de inversión (ROI).

Con base en la información previa sobre los costos asociados a cada una de las tecnologías, se procede a estimar el retorno de la inversión como un indicador clave de viabilidad económica. Es importante señalar que el sistema está diseñado principalmente para el autoconsumo; sin embargo, en caso de que la familia usuaria decida destinar la producción a la comercialización, resulta fundamental determinar el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial. Para este análisis, se toma como referencia el cultivo de lechuga, debido a que es una hortaliza de rápido crecimiento y cosecha, lo que permite obtener resultados en periodos más cortos y evaluar con mayor claridad la rentabilidad del sistema [126].

El valor obtenido para la inversión se halla sumando los valores anteriores de las tecnologías como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18.*Valor de la inversión*

Tecnología	Valor
Aireación con microburbujas Venturi/Venturi-Vortex (Dispositivo Venturi casero)	45.000\$
Kit Bomba Agua Solar Altura 2.3 Mt 3.000L/día	\$ 470.000
Estructuras verticales modulares (Se escogió una estructura vertical a pequeña escala)	\$ 2.550.000
TOTAL	\$ 3.065.000

Para este caso, se plantea trabajar con 50 plántulas de lechuga como base de producción. Cada planta alcanza un peso aproximado de 250 gramos al momento de la cosecha y tiene un valor de mercado cercano a \$2.600 por unidad. Dado que su ciclo de crecimiento y comercialización se encuentra entre 25 y 35 días, se toma un promedio de 30 días para facilitar los cálculos. Bajo esta condición, es posible realizar hasta 12 ciclos de cultivo al año, lo que permite estimar de manera clara los ingresos anuales generados por la producción y se calcula con las ecuaciones presentadas en la tabla 3.

Como primer paso, se halla el valor de ingreso anual.

$$\text{Ingresos} = 50 \times \$2.600 = \$130.000$$

$$\text{Ingreso anual} = 12 \times \$130.000 = \$1.560.000$$

Después el valor de porcentaje de retorno para así hallar en cuantos años deben transcurrir para recuperar la inversión.

$$\text{Beneficio neto} = \$1.560.000 - \$ 3.065.000 = -1.505.000$$

$$\text{ROI (\%)} = \frac{\$ -1.505.000}{\$ 3.065.000} \times 100 = -49,10\%$$

$$\text{Años de recuperación} = \frac{\$ 3.065.000}{\$1.560.000} = 1,96 \text{ años}$$

Este resultado muestra que, durante el primer año de funcionamiento, no se logra recuperar completamente la inversión inicial realizada. No obstante, el análisis del período de recuperación indica un valor aproximado de 1,96 años, lo que sugiere que el proyecto podría alcanzar el punto

de equilibrio cerca de dos años, siempre y cuando se mantengan estables las condiciones de producción y los ingresos esperados.

4.3.3. Actividad 4. Esquema del sistema acuapónico

Para proyectar el diseño del sistema acuapónico unifamiliar, se debe de tener en cuenta varios criterios, ya que este trabajo hace énfasis a la utilización de este en lugares pequeños por ende este debe tener la capacidad para alimentar a una familia de 3 personas en zona rural y 2 personas en la zona urbana, ya que este es el promedio de personas en un hogar del sur occidente de Colombia según datos estadísticos del DANE [127] .

Se utilizará peces carpa ya que son más resistentes a cambios de temperatura, OD y pH en comparación con otras especies de peces, también funciona como un limpiador natural si se presentan algas en su entorno [128], pero otra razón principal es que al utilizar esta especie de pez el control o monitoreo del sistema acuapónico se reduce, porque estos son capaces de soportar cambios bruscos en el agua [129]. En la tabla 19 se muestra cual es el rango optimo y cuál es su rango de tolerancia [130], [131], [132].

Tabla 19

Parámetros fisicoquímicos ideales y de tolerancia para la carpa común

Parámetro	Rango óptimo	Rango de tolerancia
Temperatura	24–28 °C	3–35 °C
pH	7,0–8,0	4,0–10,0
OD	5–8 mg/L	1–15 mg/L
Amoniaco (NH ₃)	<0,02 mg/L	hasta 0,2 mg/L
NO ₂ ⁻	<0,1 mg/L	hasta 1 mg/L
NO ₃ ⁻	<50 mg/L	hasta 300 mg/L

Después de obtener toda la información anterior sobre tecnologías y costos se ejecutó el diseño del sistema acuapónico unifamiliar, en el anexo D se realiza los cálculos hidráulicos del sistema acuapónico, el cual tiene las siguientes dimensiones, componentes y se muestran en la tabla 20.

Tabla 20.

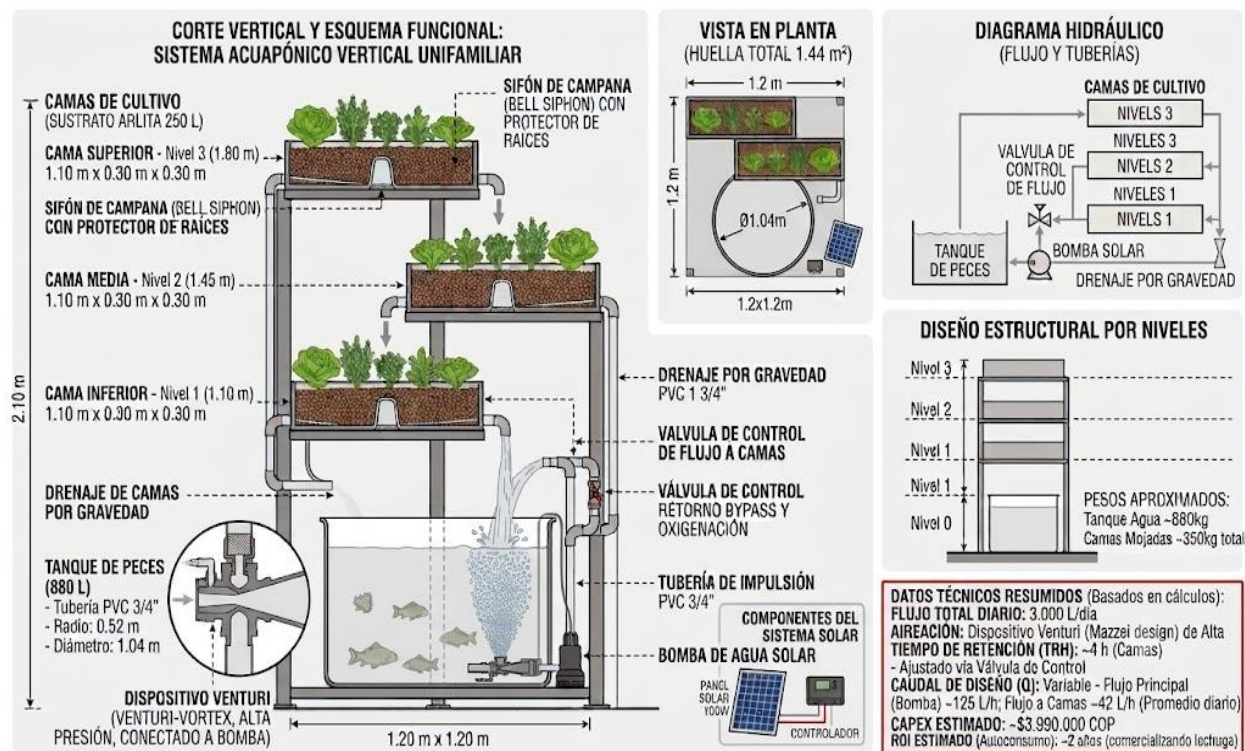
Dimensiones hidráulicas y agronómicas del sistema acuapónico unifamiliar.

Dimensiones	Valor
Volumen total del tanque de peces	0.88 m ³ (880 Litros)
Altura del agua en tanque de peces (h)	1,00 m
Diámetro para el tanque de peces (r)	1.04 m - 1.06 m
Caudal de diseño	0.000244 m ³ /s
Tiempo de retención hidráulico	1 hora
Diámetro tubería	0.021 m
Velocidad del flujo	0,70 m/s
Carga dinámica total (TDH)	2,47m
Numero de peces a utilizar	73
Área de cultivo	1.0 m ²
Numero de plantas	25 plantas/m ²

Con base en la información previamente analizada, relacionada con las dimensiones del sistema y la densidad de peces a manejar (tabla 20), se desarrolló el diseño de un sistema acuapónico de tipo unifamiliar (figura 15). Este diseño se concibió bajo un enfoque vertical hecho con material de bajo costo (PVC) con el objetivo de optimizar al máximo el uso del espacio disponible, especialmente considerando las limitaciones propias de las viviendas en entornos urbanos como la ciudad de Popayán. La elección de una configuración vertical responde a la necesidad de implementar soluciones eficientes en áreas reducidas, permitiendo integrar la producción de peces y plantas en diferentes niveles sin comprometer la funcionalidad del sistema. De esta manera, se busca no solo garantizar un adecuado rendimiento productivo, sino también facilitar su instalación y operación dentro de un contexto doméstico, promoviendo alternativas sostenibles para el autoconsumo en espacios urbanos. También se agregaron la tecnología para aireación (Aireación con microburbujas Venturi/Venturi-Vortex) utilizando un dispositivo Venturi casero y para la recirculación se implementó un Kit Bomba Agua Solar Altura 2.3 mt (3.000L/día) con el fin de reducir el gasto por consumo de electricidad que genera el sistema.

Figura 15.

Diseño del sistema acuapónico unifamiliar.



Fuente: Propia generado por IA generativa (Google Gemini)

El diseño del sistema unifamiliar, muestra eficiencia en su estructura y en su consumo energético por aireación y recirculación del agua, sin embargo, aún se está sujeto a hacerle algunas mejoras como:

4.3.4. pH estable

Mantener un pH estable en un sistema acuapónico unifamiliar se trata de lograr un buen equilibrio en todo el sistema. Es normal que el pH vaya bajando de forma natural debido a la actividad de las bacterias, los desechos de los peces y los procesos biológicos que ocurren en el agua. Por eso, lo importante es impedir que haya disminución de manera rápida o brusca. Para lo anterior, es clave llevar un control sencillo pero constante. Basta con medir el pH una o dos veces por semana y procurar que se mantenga alrededor de 6.6 a 7.0. Aun así, lo más importante es que el valor sea estable, ya que la trucha arcoíris es bastante sensible a cambios repentinos. Una práctica para mantener esa estabilidad es usar reguladores naturales dentro del sistema, como

conchas trituradas o piedra caliza, colocadas en una bolsa en zonas donde circule el agua. Estos materiales liberan minerales poco a poco, lo que ayuda a neutralizar la acidez de manera suave y continua, sin necesidad de intervenir con frecuencia. Si el pH baja más de lo deseado, se pueden hacer correcciones pequeñas y controladas usando cal agrícola o carbonato de potasio, hacer los ajustes de forma gradual, evitando cambios mayores a 0.2 o 0.3 por día.

4.3.5. Tratamiento del agua de lluvia

Para usar agua de lluvia en un sistema acuapónico, es importante tratarla antes de incorporarla, ya que puede contener suciedad, bacterias y un pH ácido que afecta a la trucha y a las plantas. Primero, durante la captación, se debe filtrar con una malla o tela para retirar hojas e insectos. Luego es fundamental desechar los primeros litros de lluvia (primer lavado), porque arrastran la mayor contaminación del techo. El agua restante debe almacenarse en un tanque cerrado y oscuro para evitar algas. Antes de usar el agua se recomienda filtrarla nuevamente con materiales simples como grava, arena y carbón vegetal, lo que mejora su calidad. Después, es necesario ajustar su pH, ya que suele ser ácido; esto se puede hacer de forma natural con cal agrícola o conchas trituradas, agregándolas poco a poco. También es importante dejar el agua reposar o airearla unas horas para estabilizarla y, antes de incorporarla al sistema, asegurarse de que tenga una temperatura similar a la del tanque para no estresar a los peces.

4.4. Guía y manual del sistema acuapónico.

El diseño del sistema acuapónico debe contemplar de una guía técnica de uso y mantenimiento y de un manual de rutinas para control de plagas y enfermedades. Con el objetivo de que sirva como herramienta de apoyo para las personas que lo vayan a emplear. En este sentido, se llevó a cabo la elaboración de un documento estructurado que integra procedimientos operativos, recomendaciones prácticas y lineamientos de conservación del sistema, con el propósito de asegurar su correcto funcionamiento a lo largo del tiempo. Estos documentos se ven en el anexo E y F.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El análisis integral del sistema acuapónico a gran escala permitió evidenciar que, aunque el modelo presenta un adecuado funcionamiento general y una interacción eficiente entre peces, plantas y bacterias nitrificantes, su estabilidad depende en gran medida del control riguroso de los parámetros fisicoquímicos del agua. Variables como el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y los compuestos nitrogenados demostraron ser altamente sensibles, influyendo directamente en la salud de los organismos y en la eficiencia productiva del sistema como se muestra en la fase I. En este sentido, se concluye que el monitoreo constante y el mantenimiento oportuno no son actividades complementarias, sino elementos fundamentales para garantizar la sostenibilidad y el equilibrio biológico de la acuaponía, especialmente cuando se busca replicar el modelo en escalas más pequeñas.

Los resultados obtenidos en la evaluación del desarrollo de peces y cultivos hortícolas evidencian que la acuaponía es una alternativa productiva viable, capaz de generar alimentos de calidad bajo condiciones controladas. Sin embargo, también se identificaron limitaciones importantes, como el crecimiento más lento de los peces en comparación con estimaciones iniciales y la susceptibilidad de los cultivos a plagas y deficiencias nutricionales. Esto permite concluir que, aunque el sistema es funcional, su eficiencia productiva está condicionada por factores ambientales, de manejo y diseño, lo que resalta la necesidad de adaptar las condiciones operativas y mejorar los tiempos de producción para optimizar los resultados.

A partir del diagnóstico técnico y operativo del sistema estudiado, se logró diseñar una propuesta de sistema acuapónico unifamiliar que responde a criterios de sostenibilidad, accesibilidad y eficiencia económica. Este nuevo enfoque demuestra que es posible minimizar el consumo de recursos partiendo de un valor aproximado de \$25,000.000 que cuesta la implementación del sistema acuapónico a gran escala a reducirlo en un valor de \$ 3.065.000 que es la estimación de lo que cuesta ejecutar el sistema acuapónico unifamiliar diseñado, todo lo anterior debido a la optimización del uso del espacio y reducción de costos operativos sin comprometer la productividad. En consecuencia, se concluye que la acuaponía a pequeña escala representa una alternativa estratégica para fortalecer la seguridad alimentaria en contextos

domésticos, promoviendo sistemas de producción autónomos, sostenibles y replicables, especialmente en comunidades con limitaciones económicas o acceso restringido a alimentos frescos.

El sistema unifamiliar alcanza un peso aproximado de 1.230 kg, de los cuales 880 kg corresponden al tanque y 350 kg a las camas de cultivo cuando están completamente húmedas. Este peso se concentra en un área relativamente pequeña, generando una carga superior a 850 kg/m², muy por encima de la capacidad para la que suelen estar diseñadas la mayoría de las losas de viviendas, que generalmente soportan entre 180 y 200 kg/m². Por ello, antes de considerar su instalación en una terraza, balcón o cubierta, es fundamental realizar una evaluación estructural que garantice que la estructura puede soportar esta carga de forma segura. Como medida preventiva y para asegurar la estabilidad del sistema a largo plazo, se recomienda instalarlo preferiblemente a nivel del suelo o sobre una base de concreto reforzado diseñada para este tipo de exigencias.

El diseño del sistema permite aprovechar la gravedad para que el consumo de energía reduzca. El agua se bombea únicamente hasta el nivel más alto, ubicado a 1,80 metros de altura, y desde allí desciende de forma natural hacia los demás niveles sin necesidad de bombeos adicionales. Gracias a esta estrategia, la bomba trabaja con menos esfuerzo, ya que solo debe elevar el agua una vez, lo que reduce significativamente los requerimientos energéticos del sistema. Esto hace posible utilizar una bomba solar de pequeña capacidad, alimentada por un panel de apenas 100 W.

Se aumentó el diámetro de la tubería de impulsión a 3/4" (0,021 m), ya que esta medida mejoró de forma significativa el desempeño y la confiabilidad del sistema. Al contar con una sección de paso más amplia, el agua circula a una menor velocidad (aproximadamente 0,70 m/s), lo que reduce considerablemente las pérdidas de energía generadas por la fricción y los accesorios de la red. Como resultado, las pérdidas de carga disminuyen de 1,26 m a cerca de 0,40 m, permitiendo que la Carga Dinámica Total (TDH) se reduzca hasta aproximadamente 2,50 m. Esto facilita el trabajo de la bomba, ayudando a que mantenga de forma más estable el caudal de diseño de 880 L/h. Además, al operar bajo condiciones menos exigentes, se reduce el desgaste de sus componentes, se prolonga la vida útil del equipo y se optimiza el consumo energético del

5.2. Recomendaciones

Se recomienda implementar un prototipo piloto del sistema acuapónico unifamiliar diseñado, con el fin de validar en condiciones reales su desempeño hidráulico, biológico y productivo, así como su capacidad para mantener estables los parámetros fisicoquímicos del agua. También utilizar otras especies acuícolas con mayor tolerancia a las variaciones ambientales, como la carpa común (*Cyprinus carpio*), ya que facilita la operación del sistema y reduce los riesgos asociados a cambios por OD, pH y temperatura. Otra recomendación es realizar un monitoreo periódico del pH y la temperatura, debido a que fueron los parámetros que presentaron mayor influencia sobre la estabilidad del sistema, el desarrollo de los peces y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Fortalecer el manejo preventivo de plagas mediante prácticas compatibles con la acuaponía, como el uso de jabón potásico, controles biológicos y revisiones frecuentes de los cultivos, evitando afectaciones en la producción vegetal. Minimizar la exposición directa de algunos componentes a la radiación solar también es otra recomendación. Con el uso de cubiertas o elementos de sombreado, con el propósito de reducir el aumento de temperatura, controlar la proliferación de algas y mantener una mejor calidad del agua. De igual manera efectuar limpiezas periódicas de filtros, tuberías y zonas de acumulación de materia orgánica, evitando la generación excesiva de compuestos nitrogenados que puedan alterar el equilibrio biológico del sistema.

Priorizar el cultivo de especies vegetales de rápido crecimiento y buena adaptación a sistemas acuapónicos, como lechuga, acelga y cebollín, debido a su eficiencia en la absorción de nutrientes y a su facilidad de manejo. Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones evalúen el comportamiento del sistema durante un ciclo productivo completo, analizando variables de crecimiento, productividad, consumo energético y rentabilidad, con el fin de optimizar y consolidar su aplicación a nivel doméstico.

Referencias

- [1] A. Iglesias y F. Medina, «Consecuencias del cambio climático para la agricultura: una problema de hoy o del futuro?», *Rev. Esp. Estud. Agrosociales Pesq.*, n.º 221, pp. 45-70, 2009, doi: 10.22004/ag.econ.168448.
- [2] D. Acuña R., «Agricultura sostenible: antecedentes e iniciativas», ODEPA - Gobierno de Chile, Chile, jul. 2015.
- [3] L. R. Brown, *Un planeta sobrepoblado y platos vacíos: La nueva geopolítica de la escasez de alimentos*. Editorial Universidad del Rosario, 2017. doi: 10.12804/CE9789587389364.
- [4] X. He *et al.*, «Agricultural diversification promotes sustainable and resilient global rice production», *Nat. Food*, vol. 4, n.º 9, pp. 788-796, sep. 2023, doi: 10.1038/s43016-023-00836-4.
- [5] S. Rahman, A. R. Anik, y J. R. Sarker, «Climate, Environment and Socio-Economic Drivers of Global Agricultural Productivity Growth», *Land*, vol. 11, n.º 4, p. 512, abr. 2022, doi: 10.3390/land11040512.
- [6] X. Chen, «The role of modern agricultural technologies in improving agricultural productivity and land use efficiency», *Front. Plant Sci.*, vol. 16, sep. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1675657.
- [7] L. Garavito González, P. Gómez Zarate, D. Palacio Tamayo, L. Garavito González, P. Gómez Zarate, y D. Palacio Tamayo, «Gobernanza territorial en los páramos chingaza y sumapaz-cruz verde. una comparación de sus principales actores y problemáticas», *Perspect. Geográfica*, vol. 23, n.º 1, pp. 11-30, jun. 2018, doi: 10.19053/01233769.6703.
- [8] C. Costa Jr, P. Thornton, y E. Wollenberg, «Global hotspots of climate change adaptation and mitigation in agriculture», *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 7, nov. 2023, doi: 10.3389/fsufs.2023.1216205.
- [9] Y. Majeed *et al.*, «Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture», *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 344-359, nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.06.032.
- [10] S. Parra-Londono, J. A. Tigreros, y C. A. Montoya-Correa, «Colombian Crop Resilience: Evaluating National Yield Stability for Fruit and Vegetable Systems», *Agriculture*, vol. 14, n.º 9, sep. 2024, doi: 10.3390/agriculture14091546.
- [11] C. I. Pardo Martínez y W. H. Alfonso P., «Climate change in Colombia: A study to evaluate trends and perspectives for achieving sustainable development from society», *Int. J. Clim. Change Strateg. Manag.*, vol. 10, n.º 4, pp. 632-652, ene. 2018, doi: 10.1108/IJCCSM-04-2017-0087.
- [12] A. Ortiz-Bobea, T. R. Ault, C. M. Carrillo, R. G. Chambers, y D. B. Lobell, «Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth», *Nat. Clim. Chang.*, vol. 11, n.º 4, pp. 306-312, abr. 2021, doi: 10.1038/s41558-021-01000-1.
- [13] S. Gawdiya, R. K. Sharma, H. Singh, y D. Kumar, «Crop diversification as a cornerstone for sustainable agroecosystems: tackling biodiversity loss and global food system challenges», *Discov. Appl. Sci.*, vol. 7, n.º 5, p. 373, abr. 2025, doi: 10.1007/s42452-025-06855-z.
- [14] L. A. Ibrahim, H. Shaghaleh, G. M. El-Kassar, M. Abu-Hashim, E. A. Elsadek, y Y. Alhaj Hamoud, «Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency», *Water*, vol. 15, n.º 24, p. 4310, ene. 2023, doi: 10.3390/w15244310.
- [15] E. Rivera, M. V. Quijano, R. M. Imbachi, S. Sanchez, Y. A. Alban, y Y. V. Flor, «Improvement Proposal based on the Optimization of Environmental Variables for the Production of an Aquaponic System (Greenhouse) at the Campus “Los Robles”, Fundación Universitaria de Popayán, Colombia», *IJRASET*, vol. 11, n.º 6, pp. 4460-4472, jun. 2023, doi: 10.22214/ijraset.2023.54465.

- [16] A. A. Farah, M. A. Mohamed, O. S. H. Musse, y B. A. Nor, «The multifaceted impact of climate change on agricultural productivity: a systematic literature review of SCOPUS-indexed studies (2015–2024)», *Discov. Sustain.*, vol. 6, n.º 1, p. 397, may 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01229-2.
- [17] C. G. Hernández Díaz-Ambrona, R. Gigena, y C. O. Mendoza Tovar, «Climate change impacts on maize and dry bean yields of smallholder farmers in Honduras», *Rev. Iberoam. Estud. Desarro. Iberoam. J. Dev. Stud.*, vol. 2, pp. 4-22, may 2013, doi: 10.26754/ojs_ried/ijds.43.
- [18] C. Cortés-Cataño, Y. Foronda-Tobón, J. Paez-Ricardo, J. Parra-Herrera, y M. Cañón Ayala, «The effect of environmental variations on the production of the principal agricultural products in Colombia», *PLOS ONE*, vol. 19, jul. 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0304035.
- [19] F. Carpena y N. Bejarano, «Less Conflict, More Food Security: A Case Study of Cauca, Colombia», *SSRN Electron. J.*, ene. 2024, doi: 10.2139/ssrn.4688855.
- [20] O. Ocampo, «El cambio climático y su impacto en el agro», *Rev. Ing.*, n.º 33, pp. 115-123, may 2011.
- [22] E. C. Francisco, T. A. Freato, A. L. Piolli, y M. E. S. D. Poz, «Analysis of the Aquaponic System Sustainability via System Dynamics Modelling – FEW Nexus Approach», *Circ.Econ.Sust.*, vol. 5, n.º 3, pp. 2577-2592, jun. 2025, doi: 10.1007/s43615-024-00408-z.
- [23] V. M. Fernández-Cabanás, G. P. Suárez-Cáceres, L. Pérez-Urrestarazu, J. Lobillo-Eguíbar, y J. A. Gross, «Contribution of Household Aquaponic Production to a Low Price Healthy Mediterranean Diet in an Economically Depressed Community», *Agronomy*, vol. 13, n.º 2, feb. 2023, doi: 10.3390/agronomy13020498.
- [24] C. D. Roldán Vélez y D. Arbeláez López, «Prototipo de sistema acuapónico automatizado con un funcionamiento mínimo viable», trabajo de grado pregrado, Universidad de Antioquia, 2021, Accedido: 25 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10495/18469>
- [25] J. Lobillo-Eguíbar, V. M. Fernández-Cabanás, L. A. Bermejo, y L. Pérez-Urrestarazu, «Economic Sustainability of Small-Scale Aquaponic Systems for Food Self-Production», *Agronomy*, vol. 10, n.º 10, sep. 2020, doi: 10.3390/agronomy10101468.
- [26] G. Baganz, E. Baganz, D. Baganz, W. Kloas, y F. Lohrberg, «Urban Rooftop Uses: Competition and Potentials from the Perspective of Farming and Aquaponics – a Berlin Case Study», *CITIES 2050 – Creat. Habitats 3rd Millenn. Smart – Sustain. – Clim. Neutral Proc. REAL CORP 2021 26th Int. Conf. Urban Dev. Reg. Plan. Inf. Soc.*, pp. 1015-1028, sep. 2021.
- [27] A. Wafiy y R. Othman, «Development of Modular and Compact Aquaponic System for Urban Farming of Plants and Fish», *J. Des. Sustain. Environ.*, vol. 3, n.º 2, Art. n.º 2, 2021.
- [28] R. Mahkeswaran y A. K. Ng, «Smart and Sustainable Home Aquaponics System with Feature-Rich Internet of Things Mobile Application», en *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, abr. 2020, pp. 607-611. doi: 10.1109/ICCAR49639.2020.9108041.
- [29] G. V. Bustos-Chiliquinga *et al.*, «Effect of Consortia of Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPBs) and Residual Phosphorus on Rhizosphere Dynamics and the Industrial Quality of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Tropical Soils», *Sustainability*, vol. 18, n.º 11, p. 5742, ene. 2026, doi: 10.3390/su18115742.
- [30] N. A. G. Sánchez y A. E. Y. C. Gómez, «La acuaponía urbana: fomentando la agricultura sostenible en entornos urbanos», *Rev. NODO*, vol. 18, n.º 35, pp. 20-29, nov. 2023, doi: 10.54104/nodo.v18n35.1616.

- [31] M. M. C. Mota, «La cientificidad de metodologías cuantitativa, cualitativa y emergentes», *Rev. Digit. Investig. En Docencia Univ.*, vol. 16, n.º 1, pp. e1555-e1555, feb. 2022, doi: 10.19083/ridu.2022.1555.
- [32] R. V. Tyson, D. D. Treadwell, y E. H. Simonne, «Opportunities and Challenges to Sustainability in Aquaponic Systems», *hortte*, vol. 21, n.º 1, pp. 6-13, feb. 2011, doi: 10.21273/HORTECH.21.1.6.
- [33] B. Lora-Ariza, A. Piña, y L. D. Donado, «Assessment of groundwater quality for human consumption and its health risks in the Middle Magdalena Valley, Colombia», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, p. 11346, may 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61259-0.
- [34] F. J. Ramírez-Coronel, O. M. Rodríguez-Elías, E. Esquer-Miranda, M. Pérez-Patricio, A. J. Pérez-Báez, y E. A. Hinojosa-Palafox, «Non-Invasive Fish Biometrics for Enhancing Precision and Understanding of Aquaculture Farming through Statistical Morphology Analysis and Machine Learning», *Animals*, vol. 14, n.º 13, p. 1850, ene. 2024, doi: 10.3390/ani14131850.
- [35] J. Monge-Solís y F. Echeverría-Beirute, «Validación de descriptores para la caracterización morfológica de cinco materiales de cas [*Psidium friedrichsthalianum* (O. BERG) Niedenzu] en Costa Rica», *Agron. Costarric.*, vol. 47, n.º 2, pp. 79-94, 2023.
- [36] A. Konya y P. Nematzadeh, «Recent applications of AI to environmental disciplines: A review», *Sci. Total Environ.*, vol. 906, p. 167705, ene. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167705.
- [37] L. Silva Araújo, K. J. Keesman, y S. Goddek, «Making Aquaponics a Business: A Framework», *Water*, vol. 13, n.º 21, p. 2978, ene. 2021, doi: 10.3390/w13212978.
- [38] B. T. Hargrave, «A traffic light decision system for marine finfish aquaculture siting», *Ocean Coast. Manag.*, vol. 45, n.º 4-5, p. 215, 2002, doi: 10.1016/S0964-5691(02)00056-X.
- [39] K. Davidson *et al.*, «HABreports: Online Early Warning of Harmful Algal and Biotxin Risk for the Scottish Shellfish and Finfish Aquaculture Industries», *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, abr. 2021, doi: 10.3389/fmars.2021.631732.
- [40] E. Roszkowska, «Entropy and Normalization in MCDA: A Data-Driven Perspective on Ranking Stability», *Entropy*, vol. 28, n.º 1, p. 114, ene. 2026, doi: 10.3390/e28010114.
- [41] R. M. P. Moreno y C. A. O. Parra, «Biological and Physiochemical Conditions of the Surface Waters of the Cauca River in the Urban Area of Popayán, Colombia», *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 20, n.º 39, pp. 263-277, jul. 2021, doi: 10.22395/rium.v20n39a15.
- [42] T. Canchala, C. Ocampo-Marulanda, W. Alfonso-Morales, Y. Carvajal-Escobar, W. L. Cerón, y E. Caicedo-Bravo, «Techniques for monthly rainfall regionalization in southwestern Colombia», *An. Acad. Bras. Ciênc.*, vol. 94, p. e20201000, 2022, doi: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220201000>.
- [43] A. A. Forchino, H. Lourguoui, D. Brigolin, y R. Pastres, «Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA)», *Aquac. Eng.*, vol. 77, pp. 80-88, may 2017, doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.03.002.
- [44] K. Mohan, D. K. Rajan, A. R. Ganesan, D. Divya, J. Johansen, y S. Zhang, «Chitin, chitosan and chitoooligosaccharides as potential growth promoters and immunostimulants in aquaculture: A comprehensive review», *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 251, p. 126285, nov. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126285.
- [45] B. Han *et al.*, «Effects of Acute Hypoxic Stress on Physiological and Hepatic Metabolic Responses of Triploid Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*)», *Front. Physiol.*, vol. 13, p. 921709, jun. 2022, doi: 10.3389/fphys.2022.921709.

- [46] A. Trivedi, R. K. Pathak, y S. Agniwanshi, «Ecological impact and aquaculture significance of *Cyprinus carpio*: A review», *Acta Entomol. Zool.*, vol. 5, n.º 2, pp. 45-46, jul. 2024, doi: 10.33545/27080013.2024.v5.i2a.154.
- [47] X. Qiu *et al.*, «Effects of common carp (*Cyprinus carpio*) on water quality in aquatic ecosystems dominated by submerged plants: a mesocosm study», *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.*, p. 28, may 2019, doi: 10.1051/kmae/2019017.
- [48] I. S. Hines *et al.*, «Steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed probiotic during the earliest developmental stages have enhanced growth rates and intestinal microbiome bacterial diversity», *Front. Mar. Sci.*, vol. 9, nov. 2022, doi: 10.3389/fmars.2022.1021647.
- [49] J. S. Ani, J. O. Manyala, F. O. Maseke, y K. Fitzsimmons, «Effect of stocking density on growth performance of monosex Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the aquaponic system integrated with lettuce (*Lactuca sativa*)», *Aquac. Fish.*, vol. 7, n.º 3, pp. 328-335, may 2022, doi: 10.1016/j.aaf.2021.03.002.
- [50] R. Pepe-Victoriano *et al.*, «Evaluation of Water Quality in the Production of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a Recirculating Aquaculture System (RAS) in the Precordilleran Region of Northern Chile», *Water*, vol. 17, n.º 11, p. 1685, ene. 2025, doi: 10.3390/w17111685.
- [51] F. Saeed *et al.*, «Developing future heat-resilient vegetable crops», *Funct. Integr. Genomics*, vol. 23, n.º 1, p. 47, ene. 2023, doi: 10.1007/s10142-023-00967-8.
- [52] I. J. B. Cedeño, J. G. V. Rivas, C. R. D. Villafuerte, F. F. P. Macias, y A. Y. P. Macias, «Hybrid aquaculture and its effects on physicochemical and biological water parameters and on the productivity of *Dormitator latifrons* and *Lactuca sativa* var. *Crisp.*», Accedido: 19 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.jeeng.net/Hybrid-aquaculture-and-its-effects-on-physicochemical-and-biological-water-parameters,211060,0,2.html>
- [53] A. Neissi, G. Rafiee, S. Rahimi, H. Farahmand, S. Pandit, y I. Mijakovic, «Enriched Microbial Communities for Ammonium and Nitrite Removal from Recirculating Aquaculture Systems», 30 de junio de 2021, *Research Square*. doi: 10.21203/rs.3.rs-636504/v1.
- [54] S. Burut-Archana, D. Ubertino, P. Chumtong, W. Mhuanong, S. Powtongsook, y S. Piyapattanakorn, «Dynamics of Microbial Community During Nitrification Biofilter Acclimation with Low and High Ammonia», *Mar. Biotechnol.*, vol. 23, n.º 4, pp. 671-681, ago. 2021, doi: 10.1007/s10126-021-10056-1.
- [55] Y. Zhou *et al.*, «Evaluation of nitrogen removal performance and metabolic mechanism of a novel salt-tolerant strain *Pseudomonas aeruginosa* SH3», *Bioresour. Technol.*, vol. 427, p. 132405, jul. 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2025.132405.
- [56] V. Ujjania, B. Sharma, D. Sharma, y B. Upadhyay, «Determination of Water Quality Parameters with Reference to Management of Aquaponics System», oct. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.22603.46887.
- [57] Y.-J. Wang, T. Yang, y H.-J. Kim, «pH Dynamics in Aquaponic Systems: Implications for Plant and Fish Crop Productivity and Yield», *Sustainability*, vol. 15, n.º 9, p. 7137, ene. 2023, doi: 10.3390/su15097137.
- [58] R. Owusu, J. C. Mayoko, y J. Y. Lee, «Prediction of Water Quality Temperature in the Growth Pattern of Fish (Nile Tilapia) and Plant (Lettuce) in a Prototype-Safe, Automated Aquaponics Environment Using Deep Learning», *Open Access Libr. J.*, vol. 11, n.º 9, pp. 1-22, sep. 2024, doi: 10.4236/oalib.1111786.
- [59] M. Klimenko, Y. Grokhovska, y L. Yashchenko, «Influence of temperature in aquaponic system on nitrification processes», *Nauk. Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bìoresursiv I Prir. Ukraïni*, vol. 21, pp. 36-48, abr. 2025, doi: 10.31548/dopovidi/2.2025.36.

- [60] H. Y. Yildiz, L. Robaina, J. Pirhonen, E. Mente, D. Domínguez, y G. Parisi, «Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review», *Water*, vol. 9, n.º 1, dic. 2016, doi: 10.3390/w9010013.
- [61] R. P. Mramba y E. J. Kahindi, «Pond water quality and its relation to fish yield and disease occurrence in small-scale aquaculture in arid areas», *Heliyon*, vol. 9, n.º 6, jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16753.
- [62] R. Omar, S. B. Mahat, M. K. Muhamad Saufi, y M. I. Aida Isma, «Ammonia conversion in an aquaponics system using activated carbon-coated and non-coated bioball in the biological treatment tank», *Mater. Today Proc.*, abr. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.678.
- [63] P. Soler, M. Faria, C. Barata, E. García-Galea, B. Lorente, y D. Vinyoles, «Improving water quality does not guarantee fish health: Effects of ammonia pollution on the behaviour of wild-caught pre-exposed fish», *PLOS ONE*, vol. 16, n.º 8, p. e0243404, ago. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0243404.
- [64] Y. Zhang *et al.*, «Influence of High Temperature and Ammonia and Nitrite Accumulation on the Physiological, Structural, and Genetic Aspects of the Biology of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*)», *Antioxidants*, vol. 14, n.º 4, p. 495, abr. 2025, doi: 10.3390/antiox14040495.
- [65] C. Jie, M. Jun, M. Teles, X. Jing, y T. Lluís, «Toxic impacts of nitrite on fish and intervention strategies», *Environ. Res.*, vol. 288, p. 123298, ene. 2026, doi: 10.1016/j.envres.2025.123298.
- [66] B. Gong, H. S. Kim, C. Y. Choi, S.-P. Hur, y J.-H. Kim, «Toxic Effects of Waterborne Nitrite on LC50, Hematological Parameters, and Plasma Biochemistry in Starry Flounder (*Platichthys stellatus*)», *Toxics*, vol. 13, n.º 9, p. 748, sep. 2025, doi: 10.3390/toxics13090748.
- [67] A. R. Al Tawaha, P. E. Megat Wahab, y H. Z. Jaafar, «Optimizing Nutrient Availability in Decoupled Recirculating Aquaponic Systems for Enhanced Plant Productivity: A Mini Review», *Nitrogen*, vol. 6, n.º 1, p. 3, mar. 2025, doi: 10.3390/nitrogen6010003.
- [68] S. Faliagka, I. Naounoulis, E. M. Pechlivani, y N. Katsoulas, «In Situ Nitrate Monitoring for Improved Fertigation in On-Demand Coupled Aquaponic Systems», *Nitrogen*, vol. 5, n.º 4, pp. 1048-1057, nov. 2024, doi: 10.3390/nitrogen5040067.
- [69] D. K. Papadopoulos, A. Lattos, I. Chatzigeorgiou, A. Tsaballa, G. K. Ntinis, y I. A. Giantsis, «The Influence of Water Nitrate Concentration Combined with Elevated Temperature on Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* in an Experimental Aquaponic Setup», *Fishes*, vol. 9, n.º 2, p. 74, feb. 2024, doi: 10.3390/fishes9020074.
- [70] K. K. Tejaswini, B. George, S. C. Mukhopadhyay, y V. J. Kumar, «Conductivity sensors for water quality monitoring: a brief review», en *Technological Solutions for Water Sustainability: Challenges and Prospects*, L. Philip, T. Pradeep, y S. M. Bhallamudi, Eds., IWA Publishing, 2023, pp. 213-221. doi: 10.2166/9781789063714_0213.
- [71] D. Nishanth *et al.*, «Current technologies for nutrient recovery in aquaponic systems: a review», *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 9, nov. 2025, doi: 10.3389/fsufs.2025.1681638.
- [72] E. Tefal *et al.*, «Feeding of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with organic ingredients replacing fish meal», *Aquaculture*, vol. 592, p. 741257, nov. 2024, doi: 10.1016/j.aquaculture.2024.741257.
- [73] L. Dai, L. Yu, L. Peng, L. Tao, Y. Liu, y G. Li, «Stochastic factors drive dynamics of ammonia-oxidizing archaeal and bacterial communities in aquaculture pond sediment», *Front. Microbiol.*, vol. 13, oct. 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.950677.

- [74] S. E. H. Mehdi *et al.*, «Pilot-Scale Evaluation of Coral Reef Media for pH Buffering and Nutrient Supply in Koi-Lettuce Aquaponics», *Water*, vol. 18, n.º 4, p. 459, ene. 2026, doi: 10.3390/w18040459.
- [75] E. R. de Souza, T. A. Ferreira, A. Pelli, N. F. Moreira, L. L. Verardo, y M. M. Pedreira, «Alkalizing potentials for recirculating systems with clear water in the Rhamdia quelen juvenile cultivation», *Aquac. Int.*, vol. 32, n.º 6, pp. 8437-8453, dic. 2024, doi: 10.1007/s10499-024-01573-6.
- [76] H. Rharrhour, W. Fatima, H. Jaziri, y A. Yahyaoui «Monitoring of the Physico-Chemical Parameters of Water in a Small Scale Aquaponic System», *Egypt. J. of Aquatic Biolo. and Fish.*, vol. 28, n.º 2, pp. 871-882, mar. 2024, doi: 10.21608/ejabf.2024.351923.
- [77] A. Mamun, «Nitrate–Conductivity Correlations in Aqueous Environments: From Standard Solutions to Natural Water Bodies», *Nitrogen*, vol. 6, n.º 2, p. 41, jun. 2025, doi: 10.3390/nitrogen6020041.
- [78] M. Aslanidou, A. Elvanidi, A. Mourantian, E. Levizou, E. Mente, y N. Katsoulas, «Nutrients Use Efficiency in Coupled and Decoupled Aquaponic Systems», *Horticulturae*, vol. 9, n.º 10, p. 1077, oct. 2023, doi: 10.3390/horticulturae9101077.
- [79] Z. Xu, H. Zhang, M. Guo, D. Fang, J. Mei, y J. Xie, «Analysis of Acute Nitrite Exposure on Physiological Stress Response, Oxidative Stress, Gill Tissue Morphology and Immune Response of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*)», *Animals*, vol. 12, n.º 14, p. 1791, ene. 2022, doi: 10.3390/ani12141791.
- [80] F. M. Yusoff, W. A. D. Umi, N. M. Ramli, y R. Harun, «Water quality management in aquaculture», *Camb. prisms Water*, vol. 2, p. e8, 2024, doi: 10.1017/wat.2024.6.
- [81] F. B. Jensen, «Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals», *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol.*, vol. 135, n.º 1, pp. 9-24, may 2003, doi: 10.1016/S1095-6433(02)00323-9.
- [82] M. Tavares-Dias, «Toxicity, physiological, histopathological, handling, growth and antiparasitic effects of the sodium chloride (salt) in the freshwater fish aquaculture», *Aquaculture Research*, vol. 53, n.º 3, pp. 715-734, feb. 2022, doi: 10.1111/are.15616.
- [83] Y. Kitaya, Y. Shimakawa, T. Wada, K. Nakamura, R. Endo, y T. Shibuya, «Biological Production and Nitrogen Use Efficiency in a Water-Sharing and Water-Saving System Combining Aquaculture and Vegetable Hydroponic Cultivation», *Water*, vol. 17, n.º 7, p. 963, ene. 2025, doi: 10.3390/w17070963.
- [84] *API Freshwater Master Test Kit Review*. [En línea]. Disponible en: <https://spec-tanks.com/api-freshwater-master-test-kit-review/>
- [85] A. Trujillo-Rogel *et al.*, «A Methodology for Evaluating the Distribution of Dissolved Oxygen in Aquaculture Ponds: An Approach Based on In Situ Respirometry and Computational Fluid Dynamics», *Aquac. J.*, vol. 6, n.º 1, p. 1, mar. 2026, doi: 10.3390/aquacj6010001.
- [86] Z. Yang *et al.*, «Numerical calculation and experimental analysis of thermal environment in industrialized aquaculture facilities», *PLOS ONE*, vol. 18, n.º 9, p. e0290449, sep. 2023, doi: 10.1371/journal.pone.0290449.
- [87] Z. Ma, J. Zhang, X. Zhang, H. Li, Y. Liu, y L. Gao, «Effects of temperature and photoperiod on growth, physiological, and behavioral performance in steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) under indoor aquaculture condition», *Front. Mar. Sci.*, vol. 10, ene. 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1114662.

- [88] Y. He, Z. Yang, y Y. Fan, «Thermal performance analysis for roofs with heat mitigation strategies in subtropical hot and humid regions», *Sci. Rep.*, vol. 15, n.º 1, p. 6117, feb. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-87835-6.
- [89] H.-K. Kim, Y.-S. Ryou, Y.-H. Kim, T.-S. Lee, S.-S. Oh, y Y.-H. Kim, «Estimating the Thermal Properties of the Cover and the Floor in a Plastic Greenhouse», *Energies*, vol. 14, n.º 7, p. 1970, ene. 2021, doi: 10.3390/en14071970.
- [90] M. Sakamoto, Y. Komatsu, y T. Suzuki, «Nutrient Deficiency Affects the Growth and Nitrate Concentration of Hydroponic Radish», *Horticulturae*, vol. 7, n.º 12, p. 525, dic. 2021, doi: 10.3390/horticulturae7120525.
- [91] D. Ji *et al.*, «Hypoxia and its feedback response to algal blooms and CH₄ emissions in subtropical reservoirs», *Front. Ecol. Evol.*, vol. 11, ene. 2024, doi: 10.3389/fevo.2023.1297047.
- [92] Q. Guan, K. Shi, y X. Pi, «Sustained deoxygenation in global flowing waters under climate warming», *Sci. Adv.*, vol. 12, n.º 20, p. eaef3132, may 2026, doi: 10.1126/sciadv.aef3132.
- [93] M. J. Islam, A. Kunzmann, y M. J. Slater, «Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: A review», *J. World Aquac. Soc.*, vol. 53, n.º 2, pp. 314-366, 2022, doi: 10.1111/jwas.12853.
- [94] F. Piccioni, C. Casenave, B. J. Lemaire, P. Le Moigne, P. Dubois, y B. Vinçon-Leite, «The thermal response of small and shallow lakes to climate change: new insights from 3D hindcast modelling», *Earth Syst. Dyn.*, vol. 12, n.º 2, pp. 439-456, abr. 2021, doi: 10.5194/esd-12-439-2021.
- [95] B. O. Musa, A. Hernández-Flores, O. A. Adeogun, y A. Oresegun, «Determination of a predictive growth model for cultivated African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1882)», *Aquac. Res.*, vol. 52, n.º 9, pp. 4434-4444, 2021, doi: 10.1111/are.15282.
- [96] R. Pepe-Victoriano *et al.*, «Growth of *Oncorhynchus mykiss* (Rainbow Trout) through a Recirculation System in the Foothills of the Extreme North of Chile», *Animals*, vol. 14, n.º 17, p. 2567, ene. 2024, doi: 10.3390/ani14172567.
- [97] J. Roy *et al.*, «Effects of Low Stocking Densities on Zootechnical Parameters and Physiological Responses of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Juveniles», *Biology*, vol. 10, n.º 10, p. 1040, oct. 2021, doi: 10.3390/biology10101040.
- [98] A. Vazirzadeh y F. Hosseinpour, «Acclimation to higher temperature and antioxidant supplemented diets improved rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) resilience to heatwaves», *ResearchGate*, abr. 2026, doi: 10.1038/s41598-024-62130-y.
- [99] C. H. Bock, K.-S. Chiang, y E. M. Del Ponte, «Plant disease severity estimated visually: a century of research, best practices, and opportunities for improving methods and practices to maximize accuracy», *Trop. Plant Pathol.*, vol. 47, n.º 1, pp. 25-42, feb. 2022, doi: 10.1007/s40858-021-00439-z.
- [100] M. Chen, «New plant health monitoring framework», *ACE*, vol. 95, n.º 1, pp. 210-215, oct. 2024, doi: 10.54254/2755-2721/95/20241744.
- [101] A. Markulj Kulundžić y D. Šimić, «Qualitative and Quantitative Plant Screening Measurements for Yield and Quality Enhancement», *Agronomy*, vol. 15, n.º 12, p. 2710, dic. 2025, doi: 10.3390/agronomy15122710.
- [102] Y. Wubetie y A. Wubetu, «Effects of staking techniques on growth and yield of tomato varieties in northwestern Ethiopia», *Sci. Rep.*, vol. 15, n.º 1, p. 20011, jun. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-95659-7.
- [103] C. K. Shreevastav, S. Subedi, S. Gajurel, y P. Basnet, «A review on nutrient deficiency symptoms and effects on tomato plant», *Food.agr.manag.*, vol. 2, n.º 1, pp. 34-36, 2022, doi: 10.26480/faer.01.2022.34.36.

- [104] C. Y. Moreno-Aguilera *et al.*, «Evaluation of LED Spectral Treatments on Morphological and Nutritional Parameters of Swiss Chard (*Beta vulgaris* var. cicla) in a Controlled Environment Agriculture System», *Agriculture*, vol. 16, n.º 2, p. 165, ene. 2026, doi: 10.3390/agriculture16020165.
- [105] A. Jones, S. P. Naroju, D. Nandwani, A. Witcher, y S. Chowdhary, «Impact of Nitrogen Fertilizer Application Rates on Plant Growth and Yield of Organic Kale and Swiss Chard in Vertical Farming System», *Horticulturae*, vol. 11, n.º 7, p. 827, jul. 2025, doi: 10.3390/horticulturae11070827.
- [106] K. G. Gebretsadik *et al.*, «Plant-aphid interactions: recent trends in plant resistance to aphids», *Stress Biol.*, vol. 5, n.º 1, p. 28, abr. 2025, doi: 10.1007/s44154-025-00214-z.
- [107] W. Kranti, G. Nivedita, y M. Shindikar, «Understanding the Plant Aphid Interaction: A Review», *EJBIO*, vol. 2, n.º 6, pp. 1-6, nov. 2021, doi: 10.24018/ejbio.2021.2.6.294.
- [108] V. Florencio-Ortiz, S. Sellés-Marchart, y J. L. Casas, «Proteome changes in pepper (*Capsicum annuum* L.) leaves induced by the green peach aphid (*Myzus persicae* Sulzer)», *BMC Plant Biol.*, vol. 21, n.º 1, p. 12, ene. 2021, doi: 10.1186/s12870-020-02749-x.
- [109] A. L. A. Ribeiro *et al.*, «Vegetation Indices for Predicting the Growth and Harvest Rate of Lettuce», *Agriculture*, vol. 13, n.º 5, p. 1091, may 2023, doi: 10.3390/agriculture13051091.
- [110] O. A. Nitu, E. Ş. Ivan, A. S. Tronac, y A. Arshad, «Optimizing Lettuce Growth in Nutrient Film Technique Hydroponics: Evaluating the Impact of Elevated Oxygen Concentrations in the Root Zone under LED Illumination», *Agronomy*, vol. 14, n.º 9, p. 1896, sep. 2024, doi: 10.3390/agronomy14091896.
- [111] S. M. Roy, R. Machavaram, C. M. Pareek, y T. Kim, «Investigating the performance of a perforated pooled circular stepped cascade aeration system for intensive aquaculture», *Heliyon*, vol. 10, n.º 5, mar. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26367.
- [112] W. Fan *et al.*, «A modelling approach to explore the optimum bubble size for micro-nanobubble aeration», *Water Res.*, vol. 228, p. 119360, ene. 2023, doi: 10.1016/j.watres.2022.119360.
- [113] M. I. Kizhisseri, M. Sakr, M. Maraqa, y M. M. Mohamed, «A comparative bench scale study of oxygen transfer dynamics using micro-nano bubbles and conventional aeration in water treatment systems», *Heliyon*, vol. 11, n.º 4, feb. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41687.
- [114] C.-C. Huang, H.-L. Lu, Y.-H. Chang, y T.-H. Hsu, «Evaluation of the Water Quality and Farming Growth Benefits of an Intelligence Aquaponics System», *Sustainability*, vol. 13, n.º 8, p. 4210, ene. 2021, doi: 10.3390/su13084210.
- [115] A. M. A.-S. Goda *et al.*, «Optimizing nutrient utilization, hydraulic loading rate, and feed conversion ratios through freshwater IMTA-aquaponic and hydroponic systems as an environmentally sustainable aquaculture concept», *Sci. Rep.*, vol. 14, n.º 1, p. 14878, jun. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-63919-7.
- [116] M. A. H. bin Zamnuri *et al.*, «Integration of IoT in Small-Scale Aquaponics to Enhance Efficiency and Profitability: A Systematic Review», *Animals*, vol. 14, n.º 17, p. 2555, ene. 2024, doi: 10.3390/ani14172555.
- [117] T. Kassem, I. Shahrour, J. El Khattabi, y A. Raslan, «Smart and Sustainable Aquaculture Farms», *Sustainability*, vol. 13, n.º 19, p. 10685, ene. 2021, doi: 10.3390/su131910685.
- [118] F. Chen *et al.*, «Design of an Intelligent Variable-Flow Recirculating Aquaculture System Based on Machine Learning Methods», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 14, p. 6546, ene. 2021, doi: 10.3390/app11146546.

- [119] M. Singh, K. S. Sahoo, y A. H. Gandomi, «An Intelligent-IoT-Based Data Analytics for Freshwater Recirculating Aquaculture System», *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, n.º 3, pp. 4206-4217, feb. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3298844.
- [120] M. H. Khanjani, M. Sharifinia, y M. G. C. Emerenciano, «Biofloc Technology (BFT) in Aquaculture: What Goes Right, What Goes Wrong? A Scientific-Based Snapshot», *Aquac. Nutr.*, vol. 2024, n.º 1, p. 7496572, 2024, doi: 10.1155/2024/7496572.
- [121] D. A. Pattillo, J. V. Hager, D. J. Cline, L. A. Roy, y T. R. Hanson, «System design and production practices of aquaponic stakeholders», *PLOS ONE*, vol. 17, n.º 4, p. e0266475, abr. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0266475.
- [122] J. D. Borrero, «Expanding the Level of Technological Readiness for a Low-Cost Vertical Hydroponic System», *Inventions*, vol. 6, n.º 4, p. 68, dic. 2021, doi: 10.3390/inventions6040068.
- [123] M. S. Gumisiriza, P. A. Ndakidemi, y E. R. Mbega, «A simplified non-greenhouse hydroponic system for small-scale soilless urban vegetable farming», *MethodsX*, vol. 9, p. 101882, ene. 2022, doi: 10.1016/j.mex.2022.101882.
- [124] L. Dominici, E. Comino, F. Torpy, y P. Irga, «Vertical Greening Systems: A Critical Comparison of Do-It-Yourself Designs», *Plants*, vol. 11, n.º 23, p. 3230, ene. 2022, doi: 10.3390/plants11233230.
- [125] F. Jensen, R. Tveterås, y R. Nielsen, «The traffic light system. Is it a solution to a nonpoint pollution problem?», *Aquac. Econ. Manag.*, vol. 28, n.º 2, pp. 177-207, abr. 2024, doi: 10.1080/13657305.2024.2301993.
- [126] E. Michalis, C.-E. Giatra, D. Skordos, y A. Ragkos, «Assessing the Different Economic Feasibility Scenarios of a Hydroponic Tomato Greenhouse Farm: A Case Study from Western Greece», *Sustainability*, vol. 15, n.º 19, p. 14233, ene. 2023, doi: 10.3390/su151914233.
- [127] G. Gallego Montes y G. Villegas Arenas, «El estado civil como determinante del crecimiento de los hogares unipersonales en Colombia», *Papeles Poblac.*, vol. 21, n.º 86, pp. 219-251, dic. 2015.
- [128] M. L. Glass, N. A. Andersen, M. Kruhøffer, E. M. Williams, y N. Heisler, «Combined Effects of Environmental PO₂ and Temperature on Ventilation and Blood Gases in the Carp *Cyprinus Carpio* L.», *J. Exp. Biol.*, vol. 148, n.º 1, pp. 1-17, ene. 1990, doi: 10.1242/jeb.148.1.1.
- [129] M. Xing *et al.*, «Transcriptome analysis reveals hypoxic response key genes and modules as well as adaptive mechanism of crucian carp (*Carassius auratus*) gill under hypoxic stress», *Front. Immunol.*, vol. 16, p. 1543605, 2025, doi: 10.3389/fimmu.2025.1543605.
- [130] T. Molayemraftar, R. Peyghan, M. Razi Jalali, y A. Shahriari, «Single and combined effects of ammonia and nitrite on common carp, *Cyprinus carpio*: Toxicity, hematological parameters, antioxidant defenses, acetylcholinesterase, and acid phosphatase activities», *Aquaculture*, vol. 548, p. 737676, feb. 2022, doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737676.
- [131] M. A. O. Dawood, M. Alkafafy, y H. Sewilam, «The antioxidant responses of gills, intestines and livers and blood immunity of common carp (*Cyprinus carpio*) exposed to salinity and temperature stressors», *Fish Physiol. Biochem.*, vol. 48, n.º 2, pp. 397-408, abr. 2022, doi: 10.1007/s10695-022-01052-w.
- [132] M. A. S. Jewel *et al.*, «Plankton dynamics and physico-chemical parameters: A longitudinal investigation in carp and catfish culture ponds», *Arch. Agric. Environ. Sci.*, vol. 8, n.º 4, pp. 597-602, dic. 2023, doi: 10.26832/24566632.2023.0804021.