

# Design and construction of a small-scale aquaponic system for food production

María E. Álvarez<sup>1</sup> , Manuel Zerpa<sup>2</sup> , Gustavo Bohórquez<sup>3</sup> , Catherine Crispo<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Metropolitana, Venezuela, mealvarez@unimet.edu.ve, mazerpaz@unimet.edu.ve, gbohorquez@correo.unimet.edu.ve, c.crispo@correo.unimet.edu.ve.

**Abstract** – Aquaponics is a symbiotic system between fish, plants and bacteria used as an alternative to agriculture, which combines hydroponics with aquaculture, in which the waste of animal species (fish) provides the necessary nutrients for the growth of plants and these, in turn, are responsible for keeping the water purified. The objective of this work was to design, build and evaluate a small-scale aquaponic system, with a cultivation area of 1 m<sup>2</sup>. It was selected to use the configuration of culture bed with substrate, combining green chard (*Beta vulgaris* var. *cicla*) with white stalk and Nilotic tilapia (*Oreochromis niloticus*). After 63 days of culture, the productivity of the system was determined by measuring the leaf length (20.7 cm), height (36.6 cm), the number of leaves (9.9) and the total biomass (3450 g) of the chard, in addition to the final mass of the fish (13.08 g) and their length (8.48 cm). The results show that the proposed system is a food production alternative capable of reducing environmental impact and enhancing productivity, with a similar performance, in terms of plant growth and development, as traditional soil cultivation.

**Keywords-** aquaponics, chard, tilapia, food, symbiosis.

# Diseño y construcción de un sistema acuapónico a pequeña escala para la producción de alimentos

María E. Álvarez<sup>1</sup> , Manuel Zerpa<sup>2</sup> , Gustavo Bohórquez<sup>3</sup> , Catherine Crispo<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Metropolitana, Venezuela, mealvarez@unimet.edu.ve, mazerpa@unimet.edu.ve, gbohorquez@correo.unimet.edu.ve, c.crispo@correo.unimet.edu.ve.

**Abstract** – *La acuaponía es un sistema simbiótico entre peces, plantas y bacterias empleada como alternativa a la agricultura, que combina la hidroponía con la acuicultura, en la cual los desechos de las especies animales (peces) aportan los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas y éstas, por su parte, se encargan de mantener el agua purificada. El objetivo del presente trabajo fue diseñar, construir y evaluar un sistema acuapónico a pequeña escala, con un área de cultivo de 1 m<sup>2</sup>. Se seleccionó emplear la configuración de cama de cultivo con sustrato, combinando acelga (*Beta vulgaris var. cicla*) verde de penca blanca y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*). Luego de 63 días de cultivo, se determinó la productividad del sistema midiendo la longitud de hoja (20.7 cm), la altura (36.6 cm), la cantidad de hojas (9.9) y la biomasa total (3450 g) de la acelga, además de la masa final de los peces (13.08 g) y la longitud de los mismos (8.48 cm). Los resultados evidencian que el sistema propuesto es una alternativa de producción de alimentos capaz de reducir el impacto ambiental y potenciar la productividad, con un desempeño similar, en cuanto al crecimiento y desarrollo de las plantas, que el cultivo tradicional en suelo.*

**Keywords**- acuaponía, acelgas, tilapia, alimentos, simbiosis.

## I. INTRODUCTION

La agricultura es una de las formas de combatir el hambre, sin embargo, representa la mayor proporción de uso de la tierra por el hombre. Se destinan aproximadamente 5000 mega hectáreas (Mha) a nivel mundial, representando el 38% de la superficie terrestre [1]. Adicionalmente, los sistemas alimentarios emplean principalmente combustibles fósiles, que consumen alrededor del 30% de la energía disponible en el mundo y producen más del 20% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [2]. Por lo tanto, para enfrentar el crecimiento exponencial de la población mundial y la inseguridad alimentaria resultante, la producción agrícola deberá duplicarse en los próximos 30 años; este hecho tendría una implicación directa en la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero [3].

Los sistemas acuapónicos, se enfocan en la rentabilidad y el tratamiento de residuos al combinar un cultivo hidropónico con la cría de especies acuáticas, resultando un método simbiótico entre peces, plantas y bacterias ecológicamente efectivo [4] como alternativa a la agricultura convencional. De este modo, satisfacen las necesidades existentes con el máximo aprovechamiento del medio y una generación mínima de residuos, de manera de equilibrar las necesidades humanas y la capacidad de la biósfera [5]. Estos sistemas utilizan apenas el 10% del agua total empleada en los métodos tradicionales, además que puede llevarse a cabo en zonas de

difícil acceso a la agricultura, en suelos poco fértiles e incluso en espacios reducidos y condiciones ambientales extremas [6].

El sistema hidropónico emplea como medio de crecimiento o soporte sustancias orgánicas o inorgánicas, inertes o no inertes sin requerir de terreno de siembra en ninguna de las etapas de crecimiento porque la planta toma los nutrientes directamente del agua, donde se encuentran disueltos [7][8]. Mientras que los sistemas de producción de alimentos acuapónicos resultan de la integración de la hidroponía con acuicultura (cultivo de peces) como fuente de nutrientes. Esta unificación elimina diversos factores no sostenibles para el mantenimiento y óptimo funcionamiento de sistemas de acuicultura e hidroponía independientemente [6].

Referencia [9] estudia la acuaponía, incluyendo las especies comunes y adecuadas para iniciar el sistema, además de los aspectos para el diseño, construcción y mantenimiento de un sistema acuapónico a cualquier escala. Así pues, las especies vegetales que más se recomiendan para los sistemas acuapónicos son aquellas de hoja verde y vegetales de pequeño porte, tales como: rábanos, cebolla, fresas, lechugas, espinacas, acelgas, perejil, albahaca, entre otras. Referencia [6] plantearon una guía práctica detallada para el cultivo integral a través de diferentes técnicas con todas las posibles combinaciones y recomendaciones de peces y plantas, mediante un sistema acuapónico a pequeña escala.

En la literatura, se encuentran tres modelos diferentes de diseño de sistemas acuapónicos que se basan en los sistemas de recirculación de acuicultura (SRA) diferenciándose en la integración del componente hidropónico. Referencia [10], realizó una comparación entre estas técnicas exponiendo las características, ventajas y desventajas de cada uno, para la selección del sistema más adecuado de acuerdo al objetivo de la producción.

Referencia [11] construyeron un sistema acuapónico que integró lechuga francesa (*Lactuca Sativa L.*) y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*), realizando una comparación entre dos tratamientos de 10 lechugas y una biomasa de peces variable (150 o 300 g), concluyendo que una mayor densidad de tilapias favorece el rendimiento agronómico del cultivo de lechuga, al medir variables como longitud y ancho de hoja, área foliar, peso fresco y peso seco. Sin embargo, una densidad menor da lugar a un crecimiento superior de las especies animales, por lo que recomiendan su empleo para sistemas a pequeña escala.

En este sentido, también pueden plantearse sistemas policultivos, Referencia [11] diseñó y construyó un sistema acuapónico a pequeña escala para el cultivo de lechuga

(*Lactuca sativa* var. *Intybacea*), albahaca (*Ocimum basilicum*) y acelga (*Beta vulgaris* var. *ciela*) con la crianza de tilapia.

En el presente trabajo se estudia experimentalmente un sistema acuapónico a pequeña escala diseñado con la finalidad de evaluar su productividad y compararla con sistemas hidropónicos y tradicionales, de tal forma que los resultados obtenidos proporcionen datos esenciales para su futuro escalamiento. Dicho proyecto busca demostrar la factibilidad del cultivo sin suelo y su provechosa aplicación para la producción de alimentos reduciendo el impacto ambiental y potenciando su productividad.

## II. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO

### A. Selección de las especies animales y vegetales

Dentro de los sistemas acuapónicos existen diversidad de especies que pueden ser cultivadas, sin embargo, las especies vegetales y animales deben ser seleccionadas considerando que los requerimientos de temperatura y pH sean similares, de manera que sea posible garantizar el bienestar de ambas, el crecimiento adecuado y especialmente el equilibrio del sistema. La selección de las especies vegetales se realizó a partir de la revisión de la literatura, resumidas en la Tabla I, considerando como factores: cantidad de plantas que se pueden obtener por metro cuadrado, tiempo de germinación, tiempo de crecimiento, rango de temperatura, exposición solar y demanda de nutrientes que requiere cada una de las especies propuestas. Estos parámetros fueron elegidos para garantizar un sistema equilibrado con una producción significativa, en un tiempo no mayor a tres meses considerando la naturaleza del proyecto y cuyo crecimiento se adaptara a las condiciones de un clima tropical. Adicionalmente, se tomaron en cuenta especies vegetales de baja demanda de nutrientes. Las plantas de hoja verde funcionan bien al inicio de los sistemas acuapónicos, cuando éstos no cuentan con una población establecida de peces, y por ende, no cumplen con altos requerimientos nutricionales [6].

Para la determinación de las especies animales se evaluaron los factores de: adaptación al medio, temperatura para su óptimo desarrollo y supervivencia, exigencia en el contenido nutricional del alimento, tasa de crecimiento promedio, pH y rango de tolerancia de nitrógeno total, oxígeno disuelto (OD) (Tabla II).

### B. Selección de la técnica de cultivo

Para la selección de la técnica de acuaponía a implementar, se realizó una comparación de las técnicas existentes en la literatura (Tabla III): cama de cultivo con sustrato, cultivo en capas de nutrientes (Nutrient Film Technique, NFT) y cultivo de aguas profundas (CAP). Como criterio de selección se consideró el tipo de plantas que se pueden cultivar, el volumen de agua empleado, la evaporación, la facilidad del diseño, el tipo de filtración requerida, el tamaño del sistema, los tipos de peces que admite y la estabilidad en las propiedades fisicoquímicas del agua.

### C. Diseño del sistema acuapónico

El diseño del sistema acuapónico debe garantizar la relación simbiótica entre las especies vegetales y animales seleccionadas, considerando los elementos esenciales: tanque de peces, filtración, componentes hidropónicos, tuberías para la recirculación del agua, sumidero y bomba de agua y aire. El diseño contempla materiales económicos y de fácil adquisición.

TABLA I  
COMPARACIÓN DE LAS ESPECIES VEGETALES COMUNES EN LA ACUAPONÍA [13, 14, 15, 16, 17, 18]

	Lechuga	Acelga	Albahaca	Pepino	Tomate	Col	Perejil
Cantidad por m <sup>2</sup> (plantas/m <sup>2</sup> )	25	25	40	5	5	8	15
Tiempo de germinación (días)	3-7	4-5	6-7	3-7	4-6	4-7	8-10
pH	6-7	6.0-7.5	5.5-6.5	5.5-6.5	5.5-6.5	6.0-7.2	6-7
Tiempo de crecimiento (días)	50-70	60-80	90-110	55-75	180-210	120-150	90-100
Temperatura (°C)	15-22	16-35	18-30	20-28	13-26	15-20	15-25
Exposición solar	Plena luz del sol	Plena luz del sol	Soleado	Plena luz del sol	Plena luz del sol	Plena luz del sol	Plena luz del sol
Demanda de nutrientes	Baja	Baja	Media baja	Media alta	Alta	Alta	Baja

TABLA II  
COMPARACIÓN DE LAS ESPECIES ANIMALES COMUNES EN LA ACUAPONÍA [6, 9, 10, 11, 12, 36]

	Tilapia del Nilo	Carpa	Bagre	Trucha
Adaptabilidad	Resistentes a patógenos y parásitos, además de la mala calidad del agua.	Toleran niveles bajos de OD y mala calidad del agua.	Extremadamente resistentes, toleran grandes variaciones de OD, temperatura y pH	Poco tolerantes a la escasez de oxígeno y altos niveles de amoníaco
Temperatura (°C)	Aguas cálidas 14-36 °C	Aguas continentales 4-34 °C	Aguas cálidas 5-34 °C	Aguas continentales 10-18 °C
Alimentación	Poco o nada exigentes. Alimentos de origen animal vegetal.	Poco exigentes, se alimentan de insectos y plantas.	Alimento paletizado.	Alta en proteínas y ricas en grasas
Proteína cruda, (%)	28-32	30-38	25-36	42
Tasa de crecimiento	No crecen por debajo de 17 °C.	Crece mejor entre 25-30 °C.	Su crecimiento se detiene a los 22°C	Disminuye su crecimiento a partir de 21°C.
	600 g en 6 - 8 meses	600 g en 9 - 11 meses	400 g en 9 - 10 meses	1.000 g en 14 - 16 meses
pH	6.5 - 9.0	7 - 8.5	6.5 - 9.0	6.5 - 8.5
Nitrógeno amoniacal (ppm)	< 2	< 1	< 1	< 0.5
Nitrito (ppm)	< 1	< 1	< 1	< 0.3
OD (ppm)	> 4	> 4	> 3	> 6

### C.1. Elementos del sistema acuapónico

Para el dimensionamiento del sistema, se tomó como base de cálculo el volumen del tanque de peces (200 L) y el área de cultivo de 1 m<sup>2</sup> por ser la mínima superficie recomendada. Se determinó, el número de plantas a cultivar y la tasa de alimentación diaria a través del procedimiento descrito en la literatura [6]. Posteriormente, se elaboró una vista isométrica general del sistema y para las tuberías a través de Autodesk Revit, así como planos de los componentes con Fusion 360.

TABLA III  
COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ACUAPONÍA [6, 9,10]

	Cama de cultivo con sustrato	Cultivo en capas de nutrientes (Nutrient Film Technique - NFT)	Cultivo de aguas profundas (CAP)
Tipo de plantas	Hortalizas de fruto alto y todo tipo de plantas	Hierbas y verduras de hoja. Plantas de pequeño porte.	Monocultivos. Generalmente plantas de hoja verde.
Volumen de agua	Medio	Bajo	Alto
Evaporación	Alta	Mínima	Mínima
Diseño	Sencillo y tolerante, pero muy pesado.	Sistema liviano, ideal para azoteas. Técnica complicada.	Unidades muy pesadas
Filtración	El sustrato funciona como filtro mecánico y biológico.	Requiere construcción de ambos filtros	Requiere construcción de ambos filtros.
Tamaño del sistema	Recomendable a pequeña escala y gran escala.	Pequeña y gran escala.	Gran escala. Producción a escala comercial
Tipo de peces	Todo tipo (herbívoros y carnívoros)	Todo tipo (herbívoros y carnívoros)	Carnívoros
Estabilidad de propiedades	Estabilidad térmica y de la calidad del agua.	Propenso a fluctuaciones térmicas y de pH	Elevada estabilidad térmica y calidad del agua.

Para la selección de la bomba, se requirió generar la curva del retorno del sumidero al tanque de peces a través del cálculo de pérdidas por fricción y por accesorios aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach (1), así como la ecuación de Swamee-Jain para la obtención de los factores de fricción (2). Posteriormente, se aplicó la ecuación general de la energía (3). Estos cálculos se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la literatura [19].

$$h_L = f(L/D)(v^2/2g) \quad (1)$$

Donde  $h_L$  se refiere a las pérdidas de energía del fluido (m),  $f$  el factor de fricción (adimensional);  $L$  la longitud de la corriente de flujo (m);  $D$  el diámetro de la tubería (m); y  $v^2/2g$  representa la carga de velocidad (m).

$$f = 0.25 / (\log((\epsilon/3.7D) + 5.74/Re^{0.9}))^2 \quad (2)$$

$$p_1/\gamma + z_1 + v_1^2/2g + h_A - h_R - h_L = p_2/\gamma + z_2 + v_2^2/2g \quad (3)$$

$\epsilon/D$  es la rugosidad relativa (adimensional);  $Re$  el número de Reynolds (adimensional),  $p_n/\gamma$  la carga de presión (m),  $z_n$  la carga de elevación (m),  $v_n^2/2g$  es la carga de velocidad (m),  $h_A$  energía añadida al fluido (m),  $h_R$  energía retirada del fluido (m),  $h_L$  pérdidas de energía del fluido (m) y  $n$  se refiere al punto 1 y 2.

A partir de la curva del retorno al tanque de peces, se realiza la propuesta de las bombas. Para ello, se utiliza la información suministrada por los fabricantes y la función de línea de tendencia para adquirir las ecuaciones de la curva de retorno y de rendimiento de cada bomba, lo que permite obtener el punto de operación de cada una. De este modo, se determina la bomba a utilizar tomando como criterios el caudal mínimo requerido para el sistema, la potencia

hidráulica que deben suministrar y la potencia nominal de cada una.

### C.2. Construcción del prototipo experimental.

A partir de la configuración del sistema acuapónico, se adquirieron las especies (animales y vegetales), equipos y materiales necesarios, y luego se procedió a la construcción del mismo. El agua del sistema no debe contener cloro, porque es perjudicial para las especies y bacterias presentes. Por esto, se utilizó agua proveniente de El Ávila, sin tratamiento químico, obtenida semanalmente en el llenadero.

### C.3. Determinación de propiedades fisicoquímicas del agua y alimentos obtenidos.

El agua es el medio que une a los tres organismos que subsisten en el sistema, las plantas, los peces y las bacterias, por lo que es fundamental mantener la calidad. Se estudió periódicamente la calidad del agua de recirculación, evaluando el nitrógeno total, pH, dureza, oxígeno disuelto, y temperatura presente en el sistema, verificando que dichos parámetros cumplieran con las condiciones de subsistencia de las especies establecidas. Posteriormente, se analizaron los alimentos cosechados en el sistema acuapónico a través de las propiedades fisicoquímicas: pH, humedad y ceniza cruda, con el fin de comparar con valores de la literatura obtenidos por medio de otras técnicas de cultivo.

Antes de comenzar el cultivo de las especies, fue necesario formar la colonia de bacterias, proceso conocido como ciclado, para disponer de organismos capaces de transformar los desechos tóxicos de los peces en nutrientes accesibles para las plantas. Para dar inicio a dicho proceso, se añadieron 15 mL de Hidróxido de Amonio ( $NH_4OH$  6 M) cada 2 días para alcanzar una concentración de al menos 1 ppm, directamente el tanque de peces. A medida que se agregó la fuente de amoníaco, aumentaron los niveles de amoníaco y nitrito, hasta que en el día 25 se mantuvo estable en 0 ppm, demostrando que la colonia de bacterias ya se encontraba estabilizada.

#### C.3.1 Propiedades del agua

La determinación de los niveles de nitrógeno total fue realizada a partir de soluciones indicadoras para el análisis de agua de la Marca API, virando de color de acuerdo a las diferentes concentraciones (ppm) de amonio (método salicilato), nitrito (diazotación-copulación de sulfanilamida con NED diclorohidrato) y/o nitrato (reacción con salicilato sódico). Estas mediciones se realizaron diariamente y luego del ciclado comenzaron a espaciarse entre cada 7 días.

La medición del pH se realizó semanalmente empleando un pHmetro, Ohaus Aquasearcher AB23PH Bench Meter, realizando las mediciones por triplicado.

Para la determinación de la dureza del agua del sistema acuapónico, se utilizó el método volumétrico de Ácido Etilendiaminotetraacético (EDTA) [20]. Se tomó una muestra de 25 mL de agua del tanque de los peces, y se diluyó con 25 mL de agua destilada para realizar la titulación con EDTA, iniciando con una solución de color morado claro hasta que el

indicador viró a azul claro, representando el punto de equivalencia. La determinación de dicha propiedad se realizó mensualmente por triplicado.

El oxígeno disuelto (OD) representa la cantidad de oxígeno gaseoso presente en el agua, el análisis de esta propiedad se realizó mensualmente por triplicado empleando el oxímetro Thermo Orion 3-Star.

#### C.4.2 Propiedades fisicoquímicas de la especie vegetal

Se determinaron las propiedades (ceniza cruda, humedad y pH) de la especie vegetal y se establecieron comparaciones de las mismas con valores de otros autores y diferentes sistemas de cultivo.

El porcentaje de ceniza cruda representa la cantidad de materia inorgánica en un alimento o materia orgánica después de ser quemado a alta temperatura. Se determinó a partir de la norma AOAC 942.05 [21], siguiendo (4).

$$\% \text{ Ceniza cruda} = (R-T) / (W-T) 100\% \quad (4)$$

Donde R es la masa del crisol más la masa de las cenizas (g), T es la masa del crisol (g) y W es la masa total del crisol con masa inicial del alimento (g).

El porcentaje de humedad en las especies vegetales se refiere a la cantidad de agua presente en la materia vegetal. Se calculó a partir del método descrito en la norma internacional AOAC 930.15 [25], secando la muestra a 135°C .

$$\%H = (\text{masa húmeda} - \text{masa seca}) 100\% / \text{masa húmeda} \quad (5)$$

Donde la masa húmeda, y la masa seca (en gramos) se refieren a la especie antes y después del proceso de secado, respectivamente.

La medición de la acidez iónica (pH) se realizó siguiendo el procedimiento definido en la norma venezolana [23].

#### C.4.3. Productividad

La productividad del sistema acuapónico se determinó en términos de la masa (en gramos) del producto vegetal (biomasa) por m<sup>2</sup>. Se compararon los valores de productividad obtenidos con sistemas de cultivo tradicionales. Adicionalmente, para la especie vegetal, se midió la longitud de las hojas, la altura, la cantidad de hojas y la biomasa de la planta. La longitud se determinó con una cinta métrica desde la base de la hoja hasta el ápice (extremo superior o punta de la hoja). Semanalmente, se realizaron 5 mediciones por cada una de las camas de cultivo para determinar un promedio de crecimiento. La altura se realizó en la cosecha, midiendo las plantas desde la base del tallo hasta el ápice. La cantidad de hojas luego de la cosecha, se determinó contando cuidadosamente el número de hojas de cada una de las especies vegetales. Durante la cosecha, se pesaron en una balanza las plantas por cada cama de cultivo, de manera de obtener la biomasa por caja y la total.

Para la especie vegetal, cada 25 días se determinó el crecimiento de los peces de acuerdo a su longitud y masa, midiendo con una cinta métrica y una balanza,

respectivamente. A los 25 y 50 días se tomaron mediciones del 10% de la población animal (9 peces), finalmente a los 75 días se realizó la medición de la totalidad de las especies.

### III. RESULTADOS

#### A. Selección de especies animales y vegetales

Se realizó una comparación de las variables consideradas entre plantas comunes en el ámbito de la acuaponía (Tabla I). En la presente investigación se seleccionó la *Beta vulgaris var. cicla* (acelga), específicamente la especie verde de penca blanca, debido a que es una hortaliza de hoja verde que puede darse adecuadamente en los tres métodos de cultivo acuapónico. La demanda de nutrientes (especialmente de nitratos) es baja, al igual que los requerimientos de potasio y fósforo son menores a las hortalizas de fruto (pepino y tomate), además de presentar una rápida tasa de crecimiento que oscila entre 60 y 80 días [6]. La acelga, es un alimento altamente nutritivo con gran aporte de fibra soluble, fuente de vitamina A y minerales, que brinda cantidades significativas de yodo, hierro y potasio recomendadas para la ingesta diaria. Adicionalmente, es una planta altamente aprovechable con una porción comestible del 70% (70 g por cada 100 g) [24].

Asimismo, la acelga es adecuada para los climas templados, cuyas temperaturas óptimas para su crecimiento son entre 16-35 °C, además que pueden crecer expuestas al sol, rango que coincide con las condiciones climáticas del área de estudio que tiene temperaturas promedio máxima y mínima de 33.95 °C y 17.23 °C. La humedad relativa que esta planta admite está comprendida entre el 60 y 90% [25], similar a la humedad relativa de 80.58% medida en el área de estudio.

En el caso de las especies animales, dentro de los factores considerados es que sea una especie que se adapte a condiciones similares a la de las acelgas, como la temperatura y el pH. Adicionalmente, se tomaron como criterios (Tabla II) la velocidad de crecimiento, adaptabilidad, requerimientos alimenticios, tolerancia al amoníaco, nitrato y niveles de oxígeno. En este trabajo, fue seleccionada la tilapia, específicamente la especie *Oreochromis niloticus*. La tilapia presenta la ventaja que es de fácil crianza, además de que crece rápidamente con alimentos balanceados con bajo contenido en proteína [6]. Son resistentes frente a condiciones críticas del agua y a diversidad de enfermedades, además de su alta capacidad de adaptación a una amplia gama de sistemas de cultivo.

#### B. Selección de la técnica de acuaponía a emplear

A partir del análisis comparativo de las técnicas existentes (Tabla III) fue seleccionada la técnica de cama de cultivo con sustrato para el diseño del sistema acuapónico, debido a su sencillez para ser implementado a pequeña escala y la ventaja que el sustrato actúa como filtro biológico y mecánico. Asimismo, presenta una oxigenación considerable al utilizar sifones de campana, parámetro importante para las especies involucradas, además de la posibilidad de cultivar

posteriormente otros tipos de plantas y peces (herbívoros o carnívoros). Adicionalmente, se seleccionó como sustrato la arcilla expandida o Aliven, debido a que proporciona aislamiento térmico, especial para zonas con exposición solar, son ligeras y proporcionan una superficie adecuada para el desarrollo de grandes colonias de bacterias, y tiene un pH neutro, siendo prácticamente inertes, por lo que no afecta la calidad del agua.

### C. Diseño del sistema acuapónico experimental

La Tabla IV resume las características generales de los componentes del sistema. Las proporciones son calculadas en función del volumen del tanque de peces.

TABLA IV  
COMPONENTES PRINCIPALES DEL PROTOTIPO ACUAPÓNICO EXPERIMENTAL

Volumen del tanque de peces (L)	Área de cultivo de las plantas (m <sup>2</sup> )	Número de plantas	Tasa de alimentación (g/día)
200	1	25	40

#### C.1. Componentes del sistema

Para el tanque de los peces se seleccionó un recipiente cilíndrico de polietileno de 200 L, de 58 cm de diámetro y 90 cm de alto, dispuesto de forma horizontal, con una apertura rectangular (0.16 m<sup>2</sup>) para permitir la manipulación de los peces, y un orificio para la salida de agua por rebose (Fig. 1). A su vez, se diseñó una estructura de acero ASTM-A366 conformada por tubulares de 2"x1" y de 1"x1", pletina de 1" (acero tipo AE-25) y láminas de 4 mm de 10x10 cm para soportar el tanque, cubierto con fondo anticorrosivo y con esmalte para protegerlo de la intemperie. Como áreas de cultivo, se utilizaron cuatro cajas plásticas multiuso de 62 L y 0.2501 m<sup>2</sup>. En cuanto al sifón de campana, el tubo vertical posee una longitud de 25 cm, la campana de 30 cm (la cual coincide con la altura del sustrato a colocar) y el filtro de sustrato 33 cm, para así impedir cualquier obstrucción por el aliven en el flujo del agua. Sobre las camas de cultivo se colocó una malla de sombra plástica verde para contrarrestar parte de la incidencia solar y proteger a las especies vegetales de amenazas externas como depredadores (aves) y/o plagas. Para el sumidero (punto más bajo del sistema) se utilizó un recipiente rectangular de vidrio de capacidad 121 L.

La Fig. 1 muestra una vista isométrica del sistema acuapónico a construir como prototipo experimental. Para la enumeración de las cajas, se estableció que la caja 1 es la más cercana al tanque de peces, mientras que la más lejana es la caja 4.

A su vez, con el fin de supervisar que las condiciones climáticas en la azotea y la temperatura del agua fuesen las adecuadas para el desarrollo de las acelgas y tilapias, se diseñó un sistema de monitorización remota a través del microcontrolador ESP8266 con dos sensores: el DS18B20 para la medición de la temperatura del agua del sistema y el DHT22 para medir la temperatura y humedad relativa del ambiente. El microcontrolador procesa los datos suministrados

y los envía a la nube, donde quedan registrados en una hoja de cálculo.

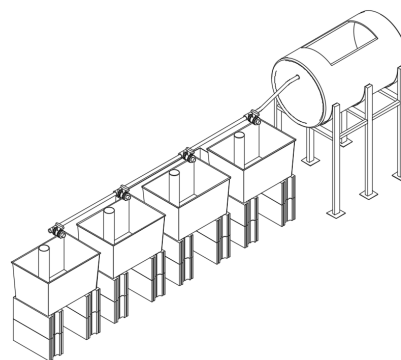


Fig. 1 Isometría del sistema acuapónico experimental

#### C.2. Flujo del agua en el sistema

Inicialmente, el agua se almacena en el tanque de peces y fluye por gravedad a las camas de cultivo, llenándose progresivamente hasta alcanzar la altura máxima (25 cm), determinada por la longitud del tubo vertical que forma parte del sifón de campana. En ese momento, se produce el vacío en los sifones, trayendo como resultado el vaciado de las cajas hacia el sumidero. El agua drenada es llevada nuevamente al tanque de los peces por medio de la bomba, considerando que el movimiento del volumen de agua en una hora debe ser como mínimo el doble del tanque de los peces [6]. Se seleccionaron tuberías de PVC cédula 40 para el sistema de recirculación de agua, utilizando diámetros de 1/2", 3/4" y 1" y los accesorios que se muestran.

Las bombas de agua para sistemas acuapónicos recomendadas por autores [6, 9] son del tipo sumergibles. Considerando el caudal mínimo requerido de 400 L/h, se estudiaron las bombas MULTI modelos 1300, 2500 y 4000 de la marca italiana SICCE, y se elaboraron sus curvas de rendimiento. A partir de ellas, se obtuvieron los puntos de operación, cuyos caudales sirvieron para el cálculo de las potencias hidráulicas. Finalmente, se seleccionó la bomba MULTI 2500 para ser utilizada en el prototipo experimental, con el fin de que el consumo eléctrico requerido sea lo menor posible y que ofrezca un caudal de operación adecuado.

#### C.3. Aireación

Se seleccionó la bomba modelo Cascade Air Charger II de la marca Penn-Plax, con capacidad de cubrir el volumen de agua presente en el tanque de peces, y que permite el funcionamiento continuo de hasta 26 horas en caso de que se presente un corte de luz.

#### C.4. Construcción del prototipo del sistema acuapónico

Partiendo del diseño propuesto, se llevó a cabo la construcción del sistema acuapónico experimental a pequeña escala en la azotea del edificio Corimón de la Universidad Metropolitana (Fig. 2).

### C.5. Propiedades fisicoquímicas del agua de recirculación.

Dentro de la colonia de bacterias es necesaria la presencia de las bacterias oxidantes de amoníaco (BOA) también llamadas, Nitrosomonas y las bacterias oxidantes de nitritos (BON), que son las Nitrobacter, que lleven a cabo el ciclo del nitrógeno, el cual inicia con el amoníaco proveniente del excremento de los peces hasta la obtención de nitratos aprovechables por las plantas para su crecimiento [9]. Adicionalmente, se requieren bacterias heterotróficas que metabolizan el 50% de las proteínas, carbohidratos, grasas, vitaminas y minerales de los desechos convirtiéndolos en micronutrientes asequibles [6]. La nitrificación es una reacción de reducción/oxidación, donde las bacterias emplean el carbono inorgánico para la síntesis celular y el nitrógeno inorgánico como fuente de energía [26].

Al inicio del ciclado, fue necesario añadir amoníaco directamente al tanque de peces para alimentar a las bacterias, para alcanzar una concentración de al menos 1 ppm. En la Figura 3 se muestran las cantidades (mg/L) del nitrógeno total, especificadas en amoníaco, nitrito y nitrato en el agua, como parámetros de diagnóstico de la salud de dichos organismos. El compuesto ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), se añadió hasta evidenciar el consumo total de amoníaco y nitrito, para producir únicamente nitrato. El proceso de ciclado duró 30 días, tiempo ideal conforme a la literatura [9].



Fig. 2. Prototipo experimental construido del sistema acuapónico de cama de cultivo con sustrato. (a) Lateral izquierdo sin malla de sombra. (b) Lateral derecho sin malla de sombra. (c) Frontal. (d) Lateral izquierdo con malla.

El proceso de nitrificación inició como era de esperarse en 0 ppm, a medida que se agregó  $\text{NH}_4\text{OH}$ , aumentaron los niveles de amoníaco y nitrito. Comenzaron a detectarse cantidades de nitrato, a partir del día 8, indicando la formación

de las BON, de ahí en adelante se evidenciaron fluctuaciones en los valores indicando la formación de nuevas bacterias. Hasta que en el día 25 se mantuvo estable la cantidad de  $\text{NO}_3^-$  y el amoníaco y nitrito en 0 ppm, demostrando que la colonia de bacterias ya se encontraba estabilizada.

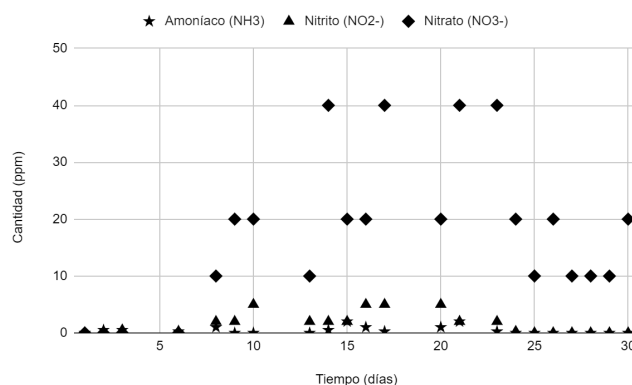


Fig. 3. Propiedades fisicoquímicas durante el ciclado

Finalizado el ciclado, se añadieron las especies animales para estabilizar los niveles óptimos de nitrógeno total (Tabla V) y asegurar la conservación de la colonia de bacterias. 12 días después, cuando los valores se encontraron en el rango y las plantas tenían el tamaño suficiente se realizó el trasplante a las cajas plásticas, dando inicio al proceso de cultivo, crecimiento y desarrollo.

En la Tabla V se comparan los valores teóricos con respecto al rango de valores obtenidos en el sistema. Todos los criterios medidos se encuentran dentro del rango de tolerancia, a excepción del pH que es ligeramente más básico que el teórico, no obstante, el agua en la acuaponía se acidifica naturalmente debido a la nitrificación y a la respiración, con el tiempo los valores de pH disminuyen al rango óptimo [6]. Por otra parte, el rango de valores de los niveles de OD se encuentran cerca del límite inferior permisible. Asimismo, la dureza del agua permaneció dentro del rango óptimo para garantizar la supervivencia de las especies.

TABLA V  
PARÁMETROS EXPERIMENTALES DEL AGUA EN EL SISTEMA ACUAPÓNICO.

	Temperatura (°C)	pH	Amoníaco (ppm)	Nitrito (ppm)	Nitrato (ppm)	OD (ppm)	KH (ppm)
Teóricos	18-30	6-7	< 3	< 1	5 - 150	> 5	60 - 140
Experimentales	20-28	7-8	0 - 0.50	0 - 0.50	5 - 40	5.50 - 5.85	125 - 131

### C.6. Propiedades fisicoquímicas de los alimentos obtenidos

Para evaluar la calidad del producto vegetal obtenido a través del sistema acuapónico, se determinaron el porcentaje de humedad, el porcentaje de ceniza cruda y el pH de las acelgas.

En la tabla VI se muestran los resultados obtenidos de la medición del porcentaje de las acelgas acuapónicas y de dos acelgas comerciales, con la respectiva desviación estándar y los resultados publicados en la literatura. Se observó que las plantas producidas en el sistema acuapónico presentan un porcentaje de humedad de 92% cercano a lo expresado en la

literatura [27][28]. Se evidencia una diferencia mayor con las comerciales 1 y 2, cuyo porcentaje de humedad es relativamente menor; no obstante, esto demuestra que las acelgas acuapónicas se encuentran dentro del rango de las acelgas comerciales y las reportadas en la literatura, verificando la calidad del producto.

TABLA VI  
COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD PROMEDIO DE LAS ACELGAS ACUAPONICAS Y COMERCIALES

Muestra	Humedad (%)	Desviación estándar
Acuapónicas, presente trabajo	92.00	0.007415
Comercial 1 (Mercado local)	84.27	0.001705
Comercial 2 (Supermercado)	84.21	0.001159
Acuapónicas, reportado por [27]	93.00	
Acuapónicas, reportado por [28]	92.11	

Por otra parte, se realizó por triplicado la determinación de cenizas de las acelgas (Tabla VII). Las cenizas representan el contenido en minerales del alimento; usualmente, el porcentaje de cenizas es menor del 5% de la materia seca de los alimentos [29]. El porcentaje de ceniza cruda obtenido para las acelgas acuapónicas fue de 1.80%, el cual se encuentra dentro del rango mostrado por las demás acelgas comerciales, dando a entender que la planta obtenida por acuaponía cumple con las especificaciones adecuadas, y posee la cantidad de materia orgánica necesaria.

TABLA VII  
COMPARACIÓN DEL PORCENTAJE DE CENIZA CRUDA DE LAS ACELGAS ACUAPONICAS Y LAS COMERCIALES

Muestra	Ceniza cruda (%)	Desviación estándar
Acuapónicas, presente trabajo	1.80	0.000573
Comercial 1 (Mercado local)	1.65	0.00172
Comercial 2 (Supermercado)	1.22	0.00491
Acuapónicas, reportado por [28]	1.50	
Acuapónicas, reportado por [30]	2.00	

También se realizó la determinación del pH de las acelgas obtenidas del presente estudio, y de especies comerciales (Tabla VIII). Los valores obtenidos son similares a los referenciados [28]. Se observa que el potencial de hidrógeno entre las cuatro acelgas tienen valores cercanos, cuyas diferencias no son significativas. Esta comparación

demuestran que las acelgas acuapónicas mantienen las propiedades de aquellas cultivadas con técnicas tradicionales.

TABLA VIII  
COMPARACIÓN DEL PH DE LAS ACELGAS ACUAPONICAS Y LAS COMERCIALES

Muestra	pH	Desviación estándar
Acuapónicas, presente trabajo	6.46	0.0287
Comercial 1 (Mercado local)	6.53	0.0309
Comercial 2 (Supermercado)	6.39	0.0478
Acuapónicas, reportado por [28]	6.14	

### C.7. Productividad del sistema acuapónico

Se trabajaron diferentes densidades de siembra (5, 6 y 9 plantas/caja) para evaluar la productividad de las camas de cultivo en función de la biomasa y la cantidad de acelgas por 0.25 m<sup>2</sup> (área de la caja plástica). La cosecha se realizó a los 63 días después del trasplante, para determinar el momento adecuado de cosecha, se consideró el tiempo estipulado en la bibliografía, el cual oscila entre 60 y 80 días [30], o cuando la altura de la planta se encuentre entre 30 y 60 cm [6]. Las acelgas acuapónicas se cosecharon cuando la altura promedio alcanzó 36.67 cm y aproximadamente 9.9 hojas por planta, cumpliendo lo sugerido por otros autores.

A partir de la cosecha de cada cama de cultivo, se evaluó la productividad de las cajas individualmente y del sistema en general, determinando la biomasa de las muestras, la cantidad de hojas de cada acelga, su longitud, medida desde la base de la hoja hasta el ápice y la altura de las mismas. Es importante señalar que la cantidad de acelgas por m<sup>2</sup>, se determinó a partir de la bibliografía [6], quienes indican que se deben tener entre 20 y 25 plantas, debido a su relativamente corto período de crecimiento. Considerando que cada cama de cultivo tiene una área de 0.25 m<sup>2</sup>, se decidió estudiar diferentes densidades de cultivo para determinar la influencia de este parámetro junto con el distanciamiento entre acelgas comparando el desarrollo de las acelgas para determinar la productividad del sistema en cuanto a las especies vegetales (Tabla IX).

En la Tabla IX, se visualizan diferencias respecto a los 5 parámetros establecidos de cada caja. La caja 2 presentó una mejor productividad total por planta, respecto a la biomasa vegetal, la altura promedio y la longitud de sus hojas. Sin embargo, obtuvo una menor cantidad de hojas a las presentadas por las camas de cultivo con menor densidad de siembra. Este resultado está ampliamente relacionado con la densidad y la distancia entre plantas, entre mayor proximidad de las acelgas, menor productividad; este fenómeno se debe a la competencia de las plantas por los recursos comunes y limitados, como la disponibilidad de luz, agua y los nutrientes [31].

Semanalmente se midió la longitud de las hojas en cada una de las camas de cultivo, obteniendo así el crecimiento



promedio de las acelgas (Fig. 4). Se observa que la caja 2 presentó un desarrollo superior al de las demás camas de cultivo, obteniendo una mayor longitud de hoja para las acelgas que la conforman, durante los 63 días transcurridos. Esta situación se debe principalmente a lo explicado anteriormente, la densidad de siembra y la cantidad de plantas, favorecieron en gran medida a esta área de cultivo. Referencia [32], indica que el crecimiento de las hojas es un indicador de que el sistema brindó las propiedades y cantidades necesarias de nutrientes y elementos minerales que aseguraron el crecimiento vigoroso.

TABLA IX  
PARÁMETROS EVALUADOS DE LA ACELGA EN LAS CAMAS DE CULTIVO

	Caja 1	Caja 2	Caja 3	Caja 4
Densidad de siembra (acelgas / 0,25m <sup>2</sup> )	5	6	5	9
Distancia promedio entre plantas (cm)	15	20	18	20
Biomasa de plantas (g)	555	1062	763	1070
Altura promedio (cm)	31.2	40.8	36.6	37.9
Longitud de hoja promedio (cm)	16.1	25.0	22.9	18.9
Cantidad de hojas promedio	10.8	9.5	10.2	9

Adicionalmente, se observó un decrecimiento por parte de la caja 1, la cual presentó un desarrollo por debajo del promedio de 5.4 cm y 4.6 cm de la altura y longitud de hojas, respectivamente. Esto se debe a que durante las primeras semanas de crecimiento, esta cama de cultivo fue víctima de una plaga que se alimentaba de las hojas, dejándolas con agujeros hasta comérselas por completo. Durante el experimento no se logró determinar con exactitud el tipo de plaga, sin embargo se eliminó los insectos de la caja, luego de eso las acelgas continuaron con su crecimiento estándar. Este fue un factor que influyó en el comportamiento de las acelgas, por lo que dicha cama de cultivo obtuvo la menor productividad.

Para determinar la productividad de cada una de las camas de cultivo, se consideró el cociente de la biomasa de las especies vegetales entre la densidad de siembra (número de plantas por área superficial) (Tabla X). Esta división resulta ser la masa promedio de las acelgas obtenidas en las cajas bajo las diferentes condiciones de siembra (densidad y distancia), demostrando cómo dichos factores influyen en el aprovechamiento de los nutrientes y por ende, en la biomasa de las plantas y su crecimiento.

Para este caso en las cajas 2 y 4, las acelgas se colocaron a la misma distancia de 20 cm, no obstante se puede notar que la productividad fue menor para la caja 4, porque teniendo mayor población obtuvo una biomasa similar a la caja 2 de densidad menor. Este fenómeno se debe a que al tener una mayor cantidad de plantas en el mismo espacio, las especies compiten para su obtención, generando crecimientos desiguales donde unos individuos crecerán más rápido mientras que otros tendrán menos aptitud para competir y su crecimiento se verá retardado [31].

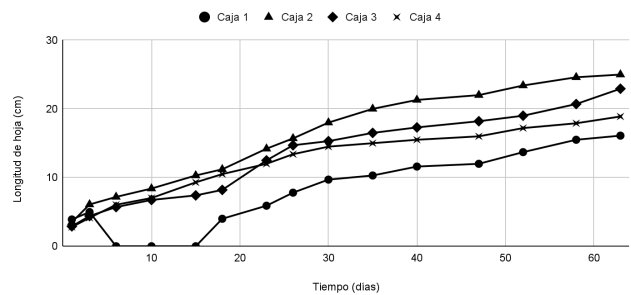


Fig. 4. Crecimiento diario de las acelgas en el sistema acuapónico

TABLA X  
PRODUCTIVIDAD DE LAS CAMAS DE CULTIVO

	Caja 1	Caja 2	Caja 3	Caja 4
Productividad (g/m <sup>2</sup> )	444.00	708.00	610.40	475.56

La productividad promedio por cama de cultivo del sistema es 559.49 g/m<sup>2</sup>. Adicionalmente la biomasa total obtenida fue 3450 g de acelga en el área de 1 m<sup>2</sup> destinada al cultivo, que fue obtenido en el área de 1 m<sup>2</sup>, en sinergia con 1095 g de la tilapia, Para comparar la productividad del sistema acuapónico con respecto a las técnicas de cultivo tradicionales, se tomaron los resultados de trabajos de investigación de cultivo de la *Beta vulgaris var.cicla*, específicamente la especie verde de penca blanca. Se tomó en cuenta que el ciclo de cultivo haya sido similar de entre 60 a 75 días, de manera de evaluar las propiedades y estudiar el comportamiento de las acelgas en los diferentes medios de cultivo (Fig. 5).

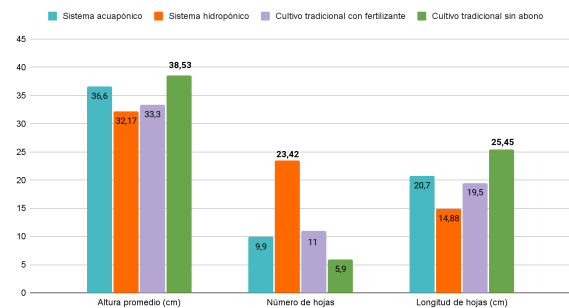


Fig. 5. Comparación de parámetros físicos de las acelgas de acuerdo a diferentes tipos de cultivo.[32, 33, 34]

En cuanto a la altura y la longitud promedio, las acelgas cultivadas bajo el sistema tradicional sin abono, obtuvieron una mejor productividad. Con respecto a las acelgas cultivadas por el sistema acuapónico, las acelgas obtenidas de cultivo tradicional son 1.96 cm más altas y 4.75 cm de mayor longitud, sin embargo poseen una menor cantidad de hojas (1 hoja menos). El sistema hidropónico tuvo un rendimiento claramente superior en cuanto al número de hojas, esto se debe

a que en Referencia [32], añadieron soluciones nutritivas y emplearon como sustrato cascarilla de arroz con ladrillo molido dosis media, mezcla que aportó una gran reserva de nutrientes y propiedades que cubrieron parte de las exigencias de las plantas. Aunque dichos fertilizantes y sustratos no favorecieron la altura y la longitud de las hojas de las acelgas.

A partir del análisis de la Fig. 5, se puede apreciar que las cuatro técnicas de cultivo, presentaron resultados similares a pesar de las diferentes condiciones y tiempos. Esto demuestra que el sistema acuapónico tuvo el comportamiento esperado incluso al estar iniciando, cuando todavía debía estabilizarse para potenciar el crecimiento vegetal, incluso superando en algunos parámetros al sistema hidropónico y el tradicional con abono.

En la Tabla XI, se muestra el crecimiento de las tilapias durante los 75 días de cultivo, luego de finalizado el ciclado, cada 25 días fueron pesados. El crecimiento de las especies animales, en cuanto a masa y longitud, estuvo por debajo del promedio comparado con otros reportes (Tabla XII).

TABLA XI  
CRECIMIENTO DE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) DURANTE 75 DÍAS

	Inicial	Días de cultivo		
		25 días	50 días	75 días
Masa (g)	0.25	4.72	9.23	13.08
Longitud (cm)	2.5	3.6	5.5	8.48

TABLA XII  
CRECIMIENTO DE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) DE ACUERDO A OTROS AUTORES

Referencia	Tiempo (días)	Volumen del tanque (m <sup>3</sup> )	Cantidad de peces	Masa (g)	Longitud (cm)
[11]	92	0.200	30	26.87	11.00
[12]	27	0.106	23	9.35	8.63
[35]	80	7.000	210	32.02	—
Presente trabajo	63	0.200	25	13.08	8.48

Las condiciones en cada uno de los reportes fueron diferentes, en el cultivo de Referencia [35], los peces fueron alimentados 3 veces al día, donde la ración de comida y el porcentaje de proteína se adaptaba a la saciedad semanal y a la etapa de cultivo respectivamente. Es por ello que disponiendo de un espacio mayor y una alimentación constante, las tilapias alcanzaron mayores dimensiones. Por otra parte, Referencia [11], alimentaron a las especies 2 veces al día con un porcentaje de proteína del 45% y obtuvieron dimensiones mayores a las alcanzadas en el prototipo experimental.

Sin embargo, el sistema diseñado en el presente proyecto contó con un tanque de 200 L, donde se daba una ración diaria de alimento de 35% de proteína. Adicionalmente, las tilapias fueron sometidas a diversas situaciones de estrés como el traslado y limpieza del tanque, lo cual pudo haber afectado negativamente su metabolismo y por ende, su crecimiento. El estrés usualmente se evidencia en sistemas de cultivo, puesto que las especies se encuentran expuestas a fluctuaciones de

diversos parámetros como temperatura, humedad relativa, oxígeno disuelto y concentración de nitritos y nitratos [36]

Otros de los factores que pudieron influir en el crecimiento de las tilapias, fue la forma de alimentación, la cual fue realizada en un solo sitio, debido a que el área de manipulación de las especies animales es limitada. En este sentido, se presentó una dificultad de una alimentación uniforme, por lo que gran parte del alimento era consumido por los peces más grandes, perjudicando el crecimiento de los peces más pequeños [36].

#### IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se diseñó y construyó un sistema acuapónico, como propuesta alternativa a los métodos de producción de alimentos convencionales. Para ello, fue requerido la selección de las especies vegetales y animales que integran el sistema acuapónico, así como la técnica de cultivo adecuada. De acuerdo a la literatura, se seleccionaron la acelga verde de penca blanca y la tilapia nilótica para el sistema acuapónico, considerando la relación simbiótica que permita obtener un crecimiento satisfactorio. Ambas especies (acelga y tilapia) poseen requerimientos similares, en cuanto a temperatura (16 a 35 °C) y pH (6.5 a 9.0), lo que permite que los vegetales y los peces subsistan en el sistema y dispongan de las condiciones adecuadas para su desarrollo.

El diseño detallado sirvió de base para la construcción del sistema acuapónico experimental, considerando una correcta recirculación del agua requerida para la integración de las tres especies involucradas: peces, bacterias y plantas.

El pH, y el contenido (en ppm) de Amoniaco, Nitrito, Nitrate, Oxígeno disuelto, KH, se midieron como parámetros para validar la calidad del agua. Los resultados indicaron que dichos parámetros se mantuvieron estables, dentro de los valores establecidos en la literatura, asegurando la supervivencia de las especies animales y vegetales durante el tiempo de la investigación.

Las acelgas acuapónicas presentaron propiedades fisicoquímicas similares a las especies acuapónicas referenciadas en la literatura, en el orden de 92% de humedad, 1.8% de ceniza cruda y 6.4 de pH. Todos estos parámetros resultaron mayores en comparación con las técnicas de cultivo tradicionales e hidropónicas.

La productividad del sistema acuapónico fue el esperado (559.49 g/m<sup>2</sup>), obteniendo una producción de 25 acelgas que obtuvieron una altura promedio de 36.6 cm, una longitud de hoja promedio de 20.7 cm y una cantidad de hojas de 9.9. Se obtuvo en el área de 1 m<sup>2</sup> la producción de 3450 g de la especie vegetal, en sinergia con 1095 g de la tilapia. En cuanto a la densidad de siembra y la distancia entre plantas es un factor determinante para el crecimiento y productividad de las especies vegetales. El crecimiento de los peces (tilapia nilótica) está fuertemente influenciado por el volumen del tanque (densidad de siembra), además del porcentaje nutricional, la forma, cantidad y dosis de alimentación diaria.

Los resultados obtenidos a través de este trabajo de investigación demuestran la factibilidad de producción sinérgica de especies vegetales y animales. Aunque la comparación con los valores referenciados en la literatura obtenidos para los parámetros físicos de la especie vegetal (altura y longitud de hojas) y para la especie animal (masa y longitud de las tilapias) favorecen a métodos tradicionales, extender el tiempo de la operación del sistema acuapónico permitirá mejorar los indicadores de productividad asociados.

## REFERENCES

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO]. Uso de la tierra en agricultura según las cifras, 2020.
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAO]. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. <https://www.fao.org>, 2016.
- [3] Instituto de Cuestiones Agrarias y Medioambientales & UNICEF. La crisis alimentaria mundial, retos y soluciones. Ciudad de Madrid, España. <https://webs.ucm.es/info/soberania.alimentaria/Conclusiones%20de%20la%20Jornada%20Internacional%20La%20Crisis%20Alimentaria%20Global,%20Retos%20y%20Soluciones%20.pdf>, (s.f.)
- [4] L. Bonilla, L. Casabianca, J. Montaña, S. Pantoja, D. Rada y C. Salcedo. "Diseño y construcción de un prototipo de sistema acuapónico para el aprovechamiento y tratamiento de desechos de piscicultura de la Hacienda La Cosmopolitana, Restrepo" *Meta. Revista de Tecnología*, vol. 14, no. 2, pp. 97-104, 2015.
- [5] S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen y M. Dos-Santos. *Aquaponics and Global Food Challenges. Aquaponics Food Production Systems*. Springer, Cham., 2019.
- [6] C. Somerville, M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, y A. Lovatelli.. Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No. 589. FAO, Roma, 2022.
- [7] J. Gilsanz. Hidroponía. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2007.
- [8] M. Zárate. Manual de hidroponía. Universidad Nacional Autónoma de México, México, Distrito Federal, 2014.
- [9] J. López. Cultivo acuapónico: Guía especializada, 2019.
- [10] P. Candarle. Técnicas de acuaponía. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC), Dirección de acuicultura. [https://www.magyp.gov.ar/sitio/areas/acuicultura/publicaciones/\\_archivos//000000\\_Desarrollos%20acu%C3%ADcolas/160831\\_T%C3%A9nicas%20de%20Acuaponia.pdf](https://www.magyp.gov.ar/sitio/areas/acuicultura/publicaciones/_archivos//000000_Desarrollos%20acu%C3%ADcolas/160831_T%C3%A9nicas%20de%20Acuaponia.pdf), sf.
- [11] C. Astudillo, R. Delgado, P. González, R. Hernández, E. Neri, P. Rivera, y M. Vásquez. "Producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) irrigada con efluentes de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico" *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, vol 8, no. 2, pp. 69-76, 2021.
- [12] D. Castañeda. Tratamiento de aguas residuales provenientes de la crianza de tilapias (*Oreochromis niloticus*) a través del sistema acuapónico de recirculación utilizando cultivos de lechuga (*Lactuca sativa* var. *Intybacea*), albahaca (*Ocimum basilicum*) y acelga (*Beta vulgaris* var. *cycla*). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú, 2019
- [13] J. Japón. La lechuga. Ministerio de agricultura. Núm. 10/77 HD [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1977\\_10.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1977_10.pdf), 1977.
- [14] H. Casilimas, C. Bojacá, O. Monsalve, R. Gil, E. Villagrán, L. Arias y L. Fuentes. Manual de producción de pepino bajo invernadero, 11° ed. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano., 2012.
- [15] L. López. Manual técnico del cultivo de tomate: *Solanum lycopersicum*. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>, 2016.
- [16] E. Zamora. El cultivo de repollo. <https://dagus.unison.mx/Zamora/COL%20O%20REPOLLO-DAG-HORT-011.pdf>, 2016.
- [17] Agexport. Albahaca, *Ocimum basilicum*. <https://www.export.com.gt/documentos/guia-de-cultivos/guia-de-cultivo-de-albahaca.pdf>, 2021.
- [18] L. Morales, I. Vilis, L. Jarri, J. Fontalvo, J. Alfonso y J. Acosta. Cultivo de perejil. <https://www.uv.mx/hab/files/2021/10/Cultivo-de-Perejil.pdf>, 2021.
- [19] R. Mott. *Mecánica de fluidos*, 7ma ed. Pearson Educación, 2015.
- [20] D. Harris. *Análisis Químico Cuantitativo*, 3° ed. Barcelona:Reverté, 2016.
- [21] AOAC. Determination of Ash in Animal Feed: AOAC Official Method 942.05 Revisited. *Journal of AOAC International*, vol. 95, no. 5, pp. 1392-1397, 2012.
- [22] AOAC. Animal Feed. AOAC 930.15.: Moisture in Animal Feed Drying at 135°. *Official Methods of Analysis of the Association Of Official Analytical Chemists*, 15 ed. *Journal of AOAC International*, vol. 1, no. 1, pp. 69, 1990.
- [23] COVENIN. Alimentos. Determinación del pH (acidez iónica). COVENIN 1315-79. Normas Venezolanas. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Fondonorma, Caracas, 1979.
- [24] Fundación Española de la Nutrición [FEN]. Acelga. <https://fen.org.es/MercadoAlimentosFEN/pdfs/accelga.pdf>
- [25] N. Meléndez. Comportamiento agronómico del cultivo de acelga (*Beta vulgaris* L.) con diferentes abonos orgánicos en la finca experimental. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, 2015.
- [26] J. Claros. Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal. [Tesis doctoral] Universitat Politècnica de València., 2012
- [27] G. Hochmuth, y D. Maynard, D. Knott's Handbook for vegetable growers. John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [28] G. Dávila. Determinación de las características físicas y químicas de la acelga *Beta vulgaris* L. variedad Gigante Fordhook. [Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero agroindustrial]. Universidad Técnica del Norte, 2006
- [29] B. Márquez. Cenizas y grasas. Teoría del muestreo. Refrigeración y congelación de alimentos: terminología, definiciones y explicaciones. [Trabajo de grado para optar por el título en Ingeniería en Industrias Alimentarias]. Universidad Nacional de San Agustín, Perú, 2014
- [30] S. Costa, M. Montenegro, T. Arregui, M. Pinto, M. Nazareno, M. y B. Mishima, B. (2003). Caracterización de acelga fresca de Santiago del Estero (Argentina). Comparación del contenido de nutrientes en hoja y tallo. *Evaluación de los carotenoides presentes. Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, vol. 23, no. 1, pp. 33-37, 2003.
- [31] J. Arcila., Densidad de siembra y productividad de los cafetales. *Sistemas de Producción de Café en Colombia*. pp.132-146. Blanecolor Ltda, 2007.
- [32] D. Marcillo y J. Quintero. Evaluación de diferentes dosis de una solución nutritiva y mezclas de sustratos en el cultivo hidropónico de acelga (*Beta vulgaris*, var. *cycla*) bajo condiciones de invernadero. [Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero agrónomo]. Universidad de Nariño, Colombia., 2015.
- [33] G. Ticona. Evaluación del abonamiento orgánico en dos variedades de acelga (*Beta vulgaris* var. *cycla*) en camas protegidas en la provincia Los Andes. [Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero en agronomía]. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia., 2011.
- [34] H. Lazo, Producción de dos variedades del cultivo de acelga (*Beta vulgaris* var. *cycla* L.) bajo la aplicación de tres niveles de compost en ambiente atemperado en centro experimental Cota. [Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero agrónomo]. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia., 2019.
- [35] M. García, F. Magallón, M. Montoya, S. Rubio, y H. Rodríguez. "Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía" *Agro Productividad*, vol. 8, no. 3, pp. 15-19, 2015.
- [36] M. Pérez y M. Sáenz. Crecimiento de las tilapias *Oreochromis niloticus* en cultivo Monosexual y Ambos sexos, en sistemas de producción semi-intensivos. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, 2015.