

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE PESQUERÍA



“PRODUCCIÓN ACUAPÓNICA DE TILAPIA DEL NILO (*Oreochromis niloticus*) Y LECHUGA (*Lactuca sativa*) CON ADICIÓN DE NUTRIENTES DEFICITARIOS EN EL SISTEMA”

TESIS PARA OPTAR TÍTULO DE INGENIERO PESQUERO

KATHYA LUZ CISNEROS RUIZ

LIMA-PERU

2021

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24-Reglamento de Propiedad Intelectual)**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE PESQUERÍA

**“PRODUCCIÓN ACUAPÓNICA DE TILAPIA DEL NILO (*Oreochromis niloticus*) Y
LECHUGA (*Lactuca sativa*) CON ADICIÓN DE NUTRIENTES DEFICITARIOS EN
EL SISTEMA”**

Presentado por:

Kathya Luz Cisneros Ruiz

Tesis para optar el Título de:

INGENIERO PESQUERO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado

M. Eng. María Cristina Miglio Toledo
Presidente

Dr. Wilfredo Lorenzo Vásquez Quispesivana
Miembro

M.Sc. Aníbal Severo Verástegui Maita
Miembro

Mg.Sc. Elsa Victoria Vega Galarza
Asesora

Mg.Sc. Beatriz Elena Angeles Escobar
Co-asesora

DEDICATORIA

A mis padres por todo el apoyo brindado y motivación para lograr este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

A la M.Sc. Elsa Vega, asesora de tesis, por el apoyo, conocimientos y consejos brindados durante el desarrollo de la presente tesis.

A la M. Sc. Beatriz Angeles y M. Eng. María Miglio por la orientación y recomendaciones brindadas en este trabajo.

A los miembros del jurado, por el aporte de conocimientos brindados durante la corrección de la tesis.

A Luzmila, compañera de tesis, por su apoyo durante el desarrollo experimental del presente trabajo.

Al Grupo de Investigación de Acuicultura Ornamental, especialmente a Regina, Cinthya, Diego, Rosario y Daniel por su ayuda durante la parte experimental del presente trabajo.

A la UNALM por el financiamiento brindado al proyecto “Utilización del efluente de un sistema de recirculación en acuicultura SRA de tilapia (*O. niloticus*) en la producción de lechuga hidropónica bajo un modelo de producción acuapónico”, dentro de la cual formó parte el presente trabajo de investigación. Asimismo, agradecer nuevamente a M.Sc. Elsa Vega, M. Sc. Beatriz Angeles y M. Eng. María Miglio por permitirme formar parte de este trabajo de investigación.

A mi familia por su confianza y consejos que siempre me brindan.

A todas las personas que estuvieron involucradas en el desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
I. INTRODUCCIÓN	15
II. REVISIÓN DE LITERTURA	18
2.1. CULTIVO DE TILAPIA	18
2.1.1. ASPECTOS GENERALES	18
2.1.2. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES	18
2.1.3. CALIDAD DE AGUA PARA EL CULTIVO DE TILAPIA	20
2.1.4. CULTIVO DE TILAPIA EN SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN	23
2.2. CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGA	24
2.2.1. ASPECTOS GENERALES	24
2.2.2. EFECTOS DE DEFICIENCIA NUTRICIONAL	25
2.2.3. ANTAGONISMO Y COMPETENCIA DE NUTRIENTES	28
2.2.4. CONCENTRACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA HIDROPÓNICA	30
2.3. SISTEMAS ACUAPÓNICOS	33
2.3.1. EL CICLO DEL NITRÓGENO EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS	34
2.3.2. TIPOS DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS	36
2.3.3. VENTAJAS DEL SISTEMA ACUAPÓNICO	38
2.3.4. CALIDAD DE AGUA EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS	38
2.3.5. NUTRIENTES DEFICITARIOS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS	42
2.3.6. PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y LECHUGAS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS	44
III. MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.1. LUGAR Y FECHA DE EJECUCIÓN	46
3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	46
3.2.1. TANQUES DE PECES	46
3.2.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA, CAMAS ACUAPÓNICAS	47
3.2.3. RECIRCULACIÓN DE AGUA	49
3.3. CAMAS HIDROPONICAS DE CONTROL	49
3.4. PECES UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN	50
3.5. PLÁNTULAS (LECHUGAS)	50

3.6.	ALIMENTACIÓN	51
3.7.	DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.....	51
3.7.1.	PRIMERA ETAPA	51
3.7.2.	SEGUNDA ETAPA.....	52
3.7.3.	TERCERA ETAPA.....	52
3.7.4.	ADICIÓN DE NUTRIENTES	53
3.7.5.	CALIDAD DE AGUA	55
3.8.	EVALUACIÓN DE PECES Y PLANTAS.....	57
3.8.1.	PECES.....	57
3.8.2.	LECHUGAS.....	59
3.9.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	60
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1.	DETERMINACIÓN DE MACRO Y MICRONUTRIENTES EN EL SISTEMA ACUAPONICO	62
4.1.1.	EVALUACIÓN DE LOS NUTRIENTES EN LAS ETAPAS DE LA EXPERIMENTACIÓN	68
4.1.2.	EVALUACIÓN DE OTROS NUTRIENTES EN LAS ETAPAS DE EXPERIMENTACIÓN	75
4.1.3.	CALIDAD DE AGUA EN EL SISTEMA ACUAPONICO	78
4.2.	DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA EN EL SISTEMA ACUAPONICO.....	95
4.2.1.	PECES.....	95
4.3.	EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN EL SISTEMA ACUAPONICO.....	97
4.3.1.	LECHUGAS.....	97
V.	CONCLUSIONES.....	102
VI.	RECOMENDACIONES	103
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
VIII.	ANEXOS	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Niveles óptimos de minerales para tilapia.....	19
Tabla 2: Concentraciones de minerales en el cultivo de tilapia.	23
Tabla 3: Parámetros de producción de tilapia en SRA.....	24
Tabla 4: Clasificación taxonómica de la lechuga.	25
Tabla 5: Antagonismos comunes de elementos que ocurren en cultivos en general.....	29
Tabla 6: Rango de concentración óptima de nutrientes y forma de absorción para cultivos de hoja.....	30
Tabla 7: Concentración de nutrientes (ppm o mg.L ⁻¹) de diferentes soluciones nutritivas usadas en el cultivo hidropónico de lechuga.....	31
Tabla 8: Niveles críticos de iones presentes en la calidad de agua para cultivo de plantas	32
Tabla 9: Rangos generales de tolerancia de calidad de agua para peces (aguas cálidas o aguas frías), plantas hidropónicas y bacterias nitrificantes	38
Tabla 10: Parámetros ideales para acuaponía entre los tres organismos (peces, plantas y bacterias).	39
Tabla 11: Concentraciones de nutrientes en sistemas acuapónicos de cultivo de tilapia y lechuga, todos los nutrientes son reportados en mg. L ⁻¹	43
Tabla 12: Concentración promedio de nutrientes en cada sistema del experimento.....	44
Tabla 13: Rango de peso inicial de peces usados en las diferentes etapas de la investigación.	50
Tabla 14: Perfil Nutricional del alimento balanceado comercial (análisis proximal garantizado).....	51
Tabla 15: Concentración de nutrientes (mg.L ⁻¹) para cultivos hidropónicos La Molina. ...	54
Tabla 16: Compuestos inorgánicos utilizados en el Sistema acuapónico.	54
Tabla 17: Equipos y frecuencia de medición de parámetros de calidad de agua.	56
Tabla 18: Cationes, aniones y micronutrientes analizados en cada etapa.	57
Tabla 19: Concentración promedio de los nutrientes en cada etapa de la investigación.....	62
Tabla 20: Concentración óptima de los nutrientes para cultivo de hojas verdes, concentración de la solución hidropónica La Molina, concentración promedio de nutrientes del sistema acuapónico y forma de absorción.....	64
Tabla 21: Concentración de nutrientes adicionados al sistema acuapónico.....	68
Tabla 22: Valores promedio de calidad de agua en el sistema acuapónico.....	79

Tabla 23: Valores promedio de los parámetros de producción del cultivo de tilapia.	95
Tabla 24: Indicadores de crecimiento en lechugas.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Configuración de un sistema de recirculación de acuaponía, Rakocy <i>et al.</i> (2006)	34
Figura 2: Representación del ciclo del nitrógeno en un sistema acuapónico (Goodman citado por Bañuelos 2017)	35
Figura 3: Diseño a menor escala de un sistema de raíz flotante o balsas flotantes; Somerville 2014.....	36
Figura 4: Diseño genérico de un Sistema de solución nutritiva recirculante. Referencias: 1. Tanque de peces; 2. Filtro mecánico; 3. Filtro biológico; 4. Componente hidropónico; 5. Sumidero con bomba; Caló 2011.	37
Figura 5: Diseño a menor escala de un sistema en camas con sustrato, Somerville 2014. .	37
Figura 6: Esquema del sistema acuapónico del trabajo de investigación.....	46
Figura 7: Tanques de los peces del Sistema acuapónico.	47
Figura 8: Camas acuapónicas del sistema experimental.	48
Figura 9. Camas hidropónicas de control.	49
Figura 10: Comparación visual del crecimiento de lechugas en el Sistema acuapónico (Izquierda) y el control-cultivo hidropónico (derecha) en la etapa 1	66
Figura 11: Variación de las concentraciones finales de macronutrientes promedio del sistema acuapónico (SCA) y el cultivo hidropónico (control) en cada una de las etapas experimentales (Letras diferentes en barras del mismo color muestran diferencias significativas $p < 0,05$).	69
Figura 12: Comparación visual del crecimiento de lechuga en el sistema acuapónico durante la etapa 1, sin adición de nutrientes; 2, con adición de nutrientes a partir de los últimos 15 días de cultivo y 3, con adición de nutrientes desde el inicio del cultivo.*Se indican los nutrientes adicionados en el sistema.....	70
Figura 13: Variación de las concentraciones finales de macronutrientes promedio del sistema acuapónico y el cultivo hidropónico control en cada una de las etapas experimentales (Letras diferentes en barras del mismo color muestran diferencias significativas $p < 0,05$).	74
Figura 14: Valores de concentración final promedio de cloruro en el sistema acuapónico y el cultivo hidropónico control (Letras diferentes en las barras muestran diferencias significativas $p < 0,05$).	76

Figura 15: Valores de concentración final promedio de sodio y bicarbonato en el sistema acuapónico y el cultivo hidropónico control	77
Figura 16: Variación de temperatura ambiental promedio durante las tres etapas de la investigación.....	81
Figura 17: Variación de temperatura promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.	82
Figura 18: Variación del oxígeno disuelto (mg.L^{-1}) promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.....	85
Figura 19: Variación del pH promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.	86
Figura 20: Variación de la alcalinidad promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.	88
Figura 21: Variación de conductividad eléctrica promedio ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) en el sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.....	89
Figura 22: Variación de nitrógeno amoniacal total (mg.L^{-1}) en las tres etapas en el tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).	90
Figura 23: Variación de nitritos (mg.L^{-1}) en las tres etapas tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).	91
Figura 24: Variación de nitratos en las tres etapas tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).	93
Figura 25. Variación de fosfatos en las tres etapas del Sistema acuapónico tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).....	94
Figura 26. Variación de la biomasa promedio en cada etapa de la investigación.	96
Figura 27: Comparación del crecimiento de lechugas, etapa 3, en sistema acuapónico y sistema hidropónico control.	99
Figura 28. Rendimiento promedio de lechugas acuapónicas y control en cada etapa del trabajo.....	101

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Componentes de la solución nutritiva concentrada La Molina.....	114
Anexo 2: Método volumétrico para determinar alcalinidad total.....	115
Anexo 3: Sistema acuapónico de la investigación.....	116
Anexo 4: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro temperatura en el tanque de peces.	117
Anexo 5: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro temperatura a la salida del biofiltro.	118
Anexo 6: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro temperatura a la salida de la cama acuapónica.	119
Anexo 7: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro oxígeno disuelto en el tanque de peces.....	120
Anexo 8: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro oxígeno disuelto en la salida del biofiltro.....	121
Anexo 9: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro oxígeno disuelto en la salida de la cama acuapónica.	122
Anexo 10: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro pH en el tanque de los peces.	123
Anexo 11: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro pH en la salida del biofiltro.....	124
Anexo 12: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro pH en la salida de la cama acuapónica.	125

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar los nutrientes deficitarios en el sistema acuapónico para su suplementación y evaluar la adición de estos nutrientes al cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) sin afectar el crecimiento de tilapia (*Oreochromis niloticus*). El sistema acuapónico fue realizado con una carga inicial de tilapia de 5 kg.m^{-3} con 20 lechugas en cada cama acuapónica, se usó la técnica hidropónica de raíces flotantes, durante 30 días por cada etapa. Se consideraron tres etapas, en la primera no se adicionó nutrientes; en la segunda, se adicionó nutrientes a partir de los últimos 15 días de cultivo y en la tercera etapa la adición de nutrientes fue desde el inicio de la experimentación. Los peces fueron alimentados diariamente con una dieta comercial de 35 por ciento de proteína y una tasa de alimentación de tres por ciento de la biomasa. Los resultados mostraron que los nutrientes con menor concentración en cultivos acuapónicos fueron K, Fe, Cu, Zn y Mn; los que fueron adicionados al sistema. Al evaluar el incremento de la biomasa de peces en cada etapa se obtuvo un incremento significativo en la tercera etapa con $2,9 \pm 0,33 \text{ kg.m}^{-3}$ durante 30 días, con tasa de crecimiento específica de $1,53 \pm 0,15$ y factor de conversión alimenticia de $1,52 \pm 0,12$. Asimismo, la mayor producción de lechuga se obtuvo en la etapa 2 con $3,18 \pm 0,6 \text{ kg}$. Finalmente, se concluye que la adición de nutrientes al sistema acuapónico no afectó el crecimiento de las tilapias.

Palabras claves: acuaponía, tilapia del Nilo, nutrientes, lechuga, sistema de recirculación.

ABSTRACT

The goal this study was to determine the deficit nutrients in the aquaponics system for supplementation and evaluate the addition of these nutrients to the lettuce culture (*Lactuca sativa*) without affecting the growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*). The aquaponics system was made with an initial tilapia load of 5 kg.m⁻³ with 20 lettuces on each aquaponic bed hydroponic floating root technique was used for 30 days for each stage. Three stages were considered, in the first no nutrients were added in the second, nutrients were added from the last 15 days of cultivation and in the third stage the addition of nutrients was from the beginning experimentation. The fish were fed daily with a commercial diet of 35 percent protein and a feed rate of three percent of biomass. The results showed that nutrients with lower concentration in aquaponic cultures It was K, Fe, Cu, Zn, and Mn; those who were added to the system. Assessing the increase in fish biomass at each stage, a significant increase was achieved in the third stage with

Keywords: acuaponics, Nile tilapia, nutrients, lettuce, recycling acuaculture systems

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2014, la producción acuícola mundial de pescado representó el 44,1 por ciento de la producción total (incluido los usos no alimentarios) de la pesca de captura y la acuicultura, mostrando una tendencia general de aumento del porcentaje de la producción acuícola en total de la producción pesquera (FAO, 2016).

A pesar de los innegables beneficios de la acuicultura como la provisión de alimentos de buena calidad y accesibles para la población, la generación de millones de empleos y millones de dólares en presupuesto para los países en desarrollo, la actividad es una de las más criticadas a nivel mundial, debido a los impactos que han generado y pueden ser causados (Martinez-Porchas y Martinez-Cordova, 2011). Entre los efectos negativos en el medio ambiente se incluyen: contaminación biológica (escape de peces), alta demanda de harina de pescado para alimentos balanceados, contaminación por descargas de efluentes acuícolas que conduce a la eutrofización, modificación de hábitat y contaminación química de antibióticos y pesticidas (Licamele, 2009).

Debido a estos problemas y al planteamiento de nuevos retos por el crecimiento de la población mundial para garantizar el desarrollo sostenible en términos económicos, sociales y ambientales (FAO, 2016); se plantean nuevas alternativas que permitan reducir la emisión de efluentes acuícolas y al mismo tiempo reducir la utilización del agua en acuicultura permitiendo maximizar la producción. Una de estas alternativas son los sistemas acuapónicos ya que combinan dos actividades que presentan limitaciones respecto al uso de agua como son la agricultura y la acuicultura, permitiendo el uso reducido de agua comparado con otros sistemas de cultivo, asimismo permite al acuicultor diversificar la producción ya que se obtendrá un producto adicional al cultivos de peces.

El sistema acuapónico se basa en el uso de los efluentes del tanque de cultivo de peces, rico en nutrientes debido a la excreción de estos, el cual será aprovechado por las plantas que

son cultivadas en sistemas hidropónicos. Al mismo tiempo, el cultivo hidropónico actúa como un biofiltro y limpia el agua para que pueda ser recirculado nuevamente al tanque de peces. Este sistema, está ganando creciente atención en todo el mundo debido a su uso eficiente de los recursos (Connolly y Trebic, 2010).

El buen manejo de la acuaponía depende de sus componentes, Rakocy *et al.* (1992) mencionan que la selección de los vegetales está directamente relacionada con la densidad de los peces y la concentración de nutrientes de los efluentes acuícolas. Asimismo, Reyes-Flores *et al.* (2016) indican que el incremento en la densidad de peces, hasta cierto punto, juega un papel importante; dado que a mayor alimento suministrado habría más nutrientes.

Por lo tanto, es evidente que se debe alcanzar un equilibrio entre la cantidad de desechos producidos y la cantidad de esos residuos que las plantas utilizarán para su crecimiento. La cantidad de desechos que los peces producen está directamente relacionada con la cantidad de alimento que consume (Lennard citado por Bañuelos, 2017). Además, se debe considerar las concentraciones de los elementos esenciales que la planta necesita para su crecimiento como los macronutrientes (carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, fósforo y azufre), los que se requieren en grandes cantidades, y los micronutrientes (cloro, hierro, manganeso, boro, zinc, cobre y molibdeno), los que se usan en cantidades considerablemente menores (Rakocy, 2002). Sin embargo, el efluente proveniente del cultivo de peces no provee en las cantidades requeridas todos los nutrientes que la planta necesita para su crecimiento. Es así que las investigaciones realizadas indican que por la deficiencia de algunos nutrientes en el medio de cultivo vegetal es necesario agregarlos en el sistema acuapónico o mediante pulverización foliar para mejorar el crecimiento vegetal; este el caso del fósforo (P), potasio (K), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y azufre (S), pero no se tiene información sobre el posible impacto de los nutrientes del agua en recirculación en el bienestar de los peces (Yavuzcan *et al.*, 2017).

Por lo expresado anteriormente, el objetivo general del presente trabajo fue determinar los nutrientes deficitarios en el sistema acuapónico para su suplementación y evaluar la adición de estos nutrientes al cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) sin afectar el crecimiento de tilapia (*Oreochromis niloticus*). Los objetivos específicos fueron:

- Determinar la cantidad de macro y micronutrientes deficitarios para el crecimiento vegetal en el sistema acuapónico.
- Determinar los parámetros de producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) como incremento de biomasa, factor de conversión alimenticia, factor de condición, tasa de crecimiento específica y supervivencia en un sistema acuapónico con la adición de nutrientes deficitarios para el cultivo vegetal.
- Evaluar el rendimiento de producción de lechuga en un sistema acuapónico con la adición de nutrientes deficitario en el sistema.

II. REVISIÓN DE LITERTURA

2.1. CULTIVO DE TILAPIA

2.1.1. ASPECTOS GENERALES

La tilapia es una especie nativa de África que en las últimas décadas ha sido introducido en prácticamente todas las regiones del planeta aptas de cultivarlo. Sus características como resistencia a enfermedades, fácil reproducción y alta adaptabilidad a diferentes ambientes, alimentos y calidades de agua la han hecho una de las especies más populares en la acuicultura de los países en vías de desarrollo (Vega-Villasante *et al.*, 2010).

En ambientes naturales, los alevines y juveniles de tilapia se alimentan de pequeños invertebrados, especialmente crustáceos del zooplancton. Los adultos de esta especie son más dependientes de las algas verde-azules (cianobacterias), diatomeas y varios tipos de macrófitas y detritus orgánico (Meyer, 2004). Fitzsimmons citado por Licamele (2009) menciona que la tilapia es una especie omnívora y tiene bajos requerimientos de proteína comparado con otras especies carnívoras.

2.1.2. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES

En cultivos comerciales la cantidad de proteína requerida por la tilapia varía de 28-36 por ciento dependiendo de la etapa y edad del pez (Popma y Masser citados por Licamele, 2009). Otros autores como Meyer (2004) recomienda los siguientes niveles de proteína para tilapia cultivada en ausencia de alimentos naturales según la etapa del pez:

- 50 por ciento de proteína cruda para alevines (menores de 30g)
- 35 a 40 por ciento de proteína cruda para peces de 30 a 100 g
- 25 a 35 por ciento para peces con pesos mayores de 100 g

Los exigencias nutricionales de la tilapia varían según la etapa en la que se encuentran, en términos cuantitativos, los requerimientos son mayores en peces jóvenes que en adultos (Torres-Novoa y Hurtado- Nery, 2012). Así, para ciertas etapas del ciclo de vida de la

Tilapia Nilótica, se espera que en la etapa de alevinos y juveniles requieren una dieta rica en proteínas, lípidos, vitaminas y minerales y menor en carbohidratos a diferencia de los peces adultos que necesitan mayor cantidad de lípidos y carbohidratos para las funciones metabólicas y un menor porcentaje de proteína para el crecimiento (Jauncey y Ross citados por Choudhary *et al.*, 2017)

Los lípidos en el alimento para tilapias cumplen dos funciones principales: sustrato para la obtención de energía metabólica y como fuente de ácidos grasos esenciales (Llanes *et al.*, 2006). La tilapia es más eficiente en la utilización de carbohidratos que de lípidos para la producción de energía. Un estudio analizó que dietas para tilapia basadas en almidón, son mejores que aquellas basadas en glucosa. Los almidones alfa, pueden ser una fuente de cadenas cortas de ácidos grasos antes de su fermentación intestinal en la tilapia nilótica. Es así que, a diferencia a otros peces de agua dulce, que requieren ácidos grasos omega 3, la tilapia requiere ácidos grasos omega 6 (Bhujel, 2002).

Las vitaminas y minerales desempeñan un papel importante en la formación de tejido óseo y sanguíneo, el crecimiento muscular y en procesos fisiológicos y metabólicos esenciales que aseguran un crecimiento, salud y reproducción adecuada (Llanes *et al.*, 2006). En la Tabla 1, se presenta los niveles óptimos de minerales para la tilapia.

Tabla 1: Niveles óptimos de minerales para tilapia

Minerales	Nivel en la dieta		
	Llanes <i>et al.</i> 2006	Bhujel 2002	El-Sayed 2006
Calcio	0 por ciento	0,3-0,7 por ciento	
Fósforo	5-10 g.kg ⁻¹ alimento	0,5-1 por ciento	4,6 g.kg ⁻¹ alimento
Magnesio	0,5-0,7 g.kg ⁻¹ alimento	0,5-0,8 g.kg ⁻¹ alimento	0,6-0,8 g.kg ⁻¹ alimento
Potasio	2 g.kg ⁻¹ alimento		2,1-3,3 g.kg ⁻¹ alimento
Zinc	20 mg.kg ⁻¹ alimento	20-30 mg.kg ⁻¹ alimento	79 mg.kg ⁻¹ alimento
Hierro	30 mg.kg ⁻¹ alimento	<17,05 mg.L ⁻¹	60 mg.kg ⁻¹ alimento
Cobre	5 mg.kg ⁻¹ alimento	<1,27 mg.L ⁻¹	
Cromo	1 mg.kg ⁻¹ alimento	2 mg.kg ⁻¹ alimento	
Selenio	0,1 mg.kg ⁻¹ alimento		
Manganeso			12 mg.kg ⁻¹ alimento

De acuerdo con El-Sayed (2006), la información disponible sobre los requerimientos de minerales en la dieta de tilapia es escasa, por lo tanto existen diversos estudios que sólo reportan el requerimiento de 6 a 9 minerales entre los que se encuentran calcio, fósforo, magnesio, zinc, manganeso, potasio, selenio, cobre, hierro y cromo (Tabla 1). Es así, que las premezclas usadas en la formulación de alimento comercial para peces sólo contienen minerales como manganeso, hierro, zinc, cobre, yodo, selenio y cobalto según lo reportado por Salinas (2017).

2.1.3. CALIDAD DE AGUA PARA EL CULTIVO DE TILAPIA

El buen crecimiento de los organismos acuáticos depende en gran parte de la calidad del agua de cultivo. Por ello es importante mantener las condiciones ambientales del agua dentro de los límites de tolerancia para la especie cultivada (Meyer, 2004).

a. TEMPERATURA

La temperatura es uno de los más importantes parámetros que afectan la fisiología, crecimiento, reproducción y metabolismo de la tilapia. Esta especie es un pez termófilo que tolera un amplio rango de temperatura del agua. El rango es aproximadamente de 20 a 35°C para el normal desarrollo, reproducción y crecimiento de la tilapia, dependiendo de la especie, el rango óptimo es de 25-30°C (Balarin y Haller, Chervinski, Philippart y Ruwet citados por El-Sayed, 2006). Los cambios de temperatura afectan directamente la tasa metabólica, mientras mayor sea la temperatura, mayor será la tasa metabólica y por consiguiente habrá mayor consumo de oxígeno (Poot *et al.*, 2009).

b. OXÍGENO DISUELTO

La concentración normal de oxígeno para la producción de tilapia varía de cinco a seis mg.L⁻¹, ya que a concentraciones menores el metabolismo y crecimiento disminuyen (SAGARPA-CONAPESCA, 2011). Asimismo, la tilapia es capaz de sobrevivir a niveles bajos de oxígeno (1 mg.L⁻¹), pero el efecto de estrés al cual se somete es la principal causa de infecciones patológicas (Poot *et al.*, 2009). Sin embargo, el nivel óptimo es con una saturación probable del 75 por ciento (Panné y Luchini, 2012).

c. pH

La tilapia presenta un mejor crecimiento en aguas de pH neutro o levemente alcalino. Disminuye su crecimiento en aguas ácidas y tolera hasta un pH de 5; un alto valor de pH (10 durante las tardes) no las afecta y el límite, aparentemente, es de 11. El rango óptimo para su cultivo varía de 6,5 a 9 (Saavedra, 2006).

d. COMPUESTOS NITROGENADOS

El nitrógeno amoniacal total (NAT) se compone de amonio no ionizado (NH_3) y amonio ionizado (NH_4^+), originado en el metabolismo de las proteínas realizada por los peces y la descomposición orgánica de los desechos sólidos en el sistema (Losordo citado por Caló, 2011). Las concentraciones de NAT no tratados en la acuicultura afectan la salud de los peces, retrasan el crecimiento y causan mortalidad (Person-Le Ruyet *et al.*, Meade, Balarin y Haller, Smart citados por Morrow, 2009) El amonio no ionizado es extremadamente tóxico para los peces, y su cantidad depende del pH y la temperatura del agua; en el caso de la tilapia del Nilo, esta puede tolerar niveles altos que van desde 1,1 a 4,1 mg.L^{-1} de N- NH_3 durante largos periodos de tiempo (hasta 96 horas), mostrando una mortalidad del 50 por ciento (Abdalla *et al.* citados por Ingle de la Mora *et al.*, 2003).

Los nitritos son un producto intermedio en el proceso de nitrificación y al igual que el amonio no ionizado, son tóxicos en concentraciones relativamente bajas dependiendo de la especie a cultivar (Caló, 2011); en el cultivo de tilapia valores mayores a 5 mg.L^{-1} provocan mortalidad de esta especie (Rakocy, Liñán citados por Bernuy, 2016). Uno de los factores limitantes en la nitrificación es la concentración de oxígeno disuelto en el agua, así una concentración igual o mayor de oxígeno de 2 mg.L^{-1} puede resultar en una tasa de nitrificación adecuada (Gallego-Alarcon y García-Pulido, 2017).

Los nitratos son el producto final del proceso de nitrificación y es la forma nitrogenada menos tóxica para los peces (Masser citado por Caló, 2011). Es así, que en el cultivo de tilapia concentraciones de 600 a 700 mg.L^{-1} afectan su consumo de alimento (Rakocy *et al.*, 2000).

En términos químicos es común expresar los compuestos inorgánicos nitrogenados en términos del nitrógeno que contengan, resultando $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (nitrógeno amoniacal ionizado), $\text{NH}_3\text{-N}$ (nitrógeno amoniacal no ionizado), $\text{NO}_2\text{-N}$ (nitrógeno de nitritos) y $\text{NO}_3\text{-N}$ (nitrógeno de nitratos) (Regalado, 2013).

e. MINERALES

Los tilapias pueden absorber algunos minerales no sólo de la dieta, sino también del ambiente acuático, como el calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, zinc, cobre, y selenio (Torres-Novoa y Hurtado-Nery, 2012).

Los minerales son utilizados en los procesos vitales de las tilapias, cuyas concentraciones se muestran en la Tabla 2, como formación de estructura de esqueleto, regulación de equilibrio ácido-base y osmoregulación, componentes de hormonas y enzimas, activación de enzimas, regulación de la captación, almacenamiento y excreción de varios elementos inorgánicos, permitiendo un equilibrio dinámico entre el pez y el medio acuático (Torres-Novoa y Hurtado-Nery, 2012). En el caso del calcio, este puede ser suplida directamente del agua en un 65 a 80 por ciento, por medio de la absorción activa en las branquias, asimismo, la absorción de este mineral también se realiza por las aletas y el epitelio oral. Los requerimientos del calcio en el cultivo de tilapia están influenciados por la composición físico química del agua y el contenido de calcio en la dieta (NRC citado por Torres-Novoa y Hurtado-Nery, 2012).

El fósforo puede ser absorbido del agua a través de las branquias en menor proporción que el calcio. La absorción de fósforo depende de la solubilidad en el punto de contacto con la membrana de absorción y también del grado de molido del alimento (Santosh citado por Torres-Novoa y Hurtado-Nery, 2012).

Tabla 2: Concentraciones de minerales en el cultivo de tilapia

Parámetro	Rango óptimo (mg.L⁻¹)
Calcio	5 a 160
Fósforo Total	0,01 a 3
Magnesio	0 a 36
Manganeso	0 a 0,01
Fosfatos	0,5 a 1,5
Cromo	0 a 0,03
Hierro	0 a 0,015
Cobre en aguas duras	0 a 0,03
Cobre en aguas blandas	0 a 0,006
Cadmio en aguas duras	0 a 0,003
Cadmio en aguas blandas	0 a 0,004
Zinc	0 a 0,05

Fuente: Cantor (2007)

2.1.4. CULTIVO DE TILAPIA EN SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN

Los sistemas de recirculación acuícola son un conjunto de procesos y componentes que se utilizan para el cultivo de organismos acuáticos, donde el agua es continuamente limpiada y reutilizada. El agua es limpiada por filtración mecánica, el cual remueve los desechos particulados; y por filtración biológica, que remueve los desechos disueltos por reacciones bioquímicas que ocurren durante el metabolismo bacteriano. Este sistema permite reducir el uso del agua ya que se realiza un recambio de solo 10 por ciento aproximadamente (Libey citado por Gamble, 1999).

La calidad de agua en sistemas de recirculación (SRA) se ve afectada por la presencia y acumulación de heces, alimento no digerido, parásitos y flocs bacterianos, que pueden aumentar el estrés de los organismos cultivados (Brambila *et al.* citados por Sánchez *et al.*, 2013). La eficiencia en estos tipos de cultivo depende de que el funcionamiento del sistema permita mantener las condiciones de calidad de agua necesarias para el buen crecimiento de la especie (Timmons y Ebeling, 2007). El uso de agua en estos sistemas se puede optimizar,

reutilizándola a través de la remoción de sólidos, de compuestos nitrogenados y de la oxigenación en el sistema (García *et al.*, Piedrahita citados por Trasviña, 2007).

Los niveles de producción en sistemas de recirculación varían de 60 a 120 kg.m⁻³ del volumen de los tanques de engorda, o más (Rakocy, 2005). Asimismo, Zimmermann y Fitzimmons (2004), mencionan que a densidades de 50 a 200 tilapias.m⁻³ se obtiene una producción media que varía de 25 a 100 kg.m⁻³.

Arnulfo (2015) reporta en su estudio que al aumentar la densidad de peces en un cultivo de tilapia en sistema de recirculación (SRA), los parámetros de producción no se ven afectados (Tabla 3).

Tabla 3: Parámetros de producción de tilapia en SRA

Parámetros de producción	Resultados	
	30 peces/100 L	40 peces/100 L
TCE (%.día ⁻¹)	2,49 ± 0,45	2,09 ± 0,3
Factor de conversión alimenticia (FCR)	1,21 ± 0,27	1,24
Factor de condición (K)	1,50 ± 0,22	1,51 ± 0,42

Fuente: Arnulfo (2015)

Los estudios realizados por Aguilar (2010) quién evaluó el efecto del procesamiento de alimento (extruido y peletizado) sobre los parámetros productivos de tilapia nilótica en SRA por fases, alcanzaron resultados de tasa específica de crecimiento (TCE) de 3,38 ± 0,06 y 1,326 ± 0,028 %.día⁻¹; factor de condición (K) de 1,86 ± 0,01 y 1,94 ± 0,03 y conversión alimenticia de 0,76 ± 0,02 y 1,07 ± 0,02 para las fases de crecimiento 1 y 2 con alimento extruido de 36,4 y 31,2 por ciento de proteína, respectivamente.

2.2. CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGA

2.2.1. ASPECTOS GENERALES

La lechuga es una de las especies más importante del grupo de hortalizas de hoja, la cual es cultivada al aire libre en zonas templadas (Santos *et al.*, Fu *et al.*, Balsam *et al.*, citados por Martínez *et al.*, 2015). Este vegetal es el segundo cultivo más producido a nivel hidropónico después del tomate, el tiempo de germinación y desarrollo varía entre 50-60 días. Su cultivo

en técnicas hidropónicas es muy económico y seguro ya que se aprovecha los recursos como el agua y fertilizantes (Alpizar citado por Grande y Luna, 2010). Esta especie se adapta a las temperaturas bajas, siendo el rango óptimo de 18 a 23°C durante el día y de 7 a 15° durante la noche (Quintero *et al.*, 2000; Jacques y Hernández, 2005). En la Tabla 4 se presenta la clasificación taxonómica de este vegetal.

Tabla 4: Clasificación taxonómica de la lechuga

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Subfamilia	Cichorioideae
Género	Lactuca
Especie	<i>Lactuca sativa</i>
	Capitata (lechuga de cabeza, lisa o mantecosa)
Variedad botánica	Longifolia (romana o cos) Inybacea (lechugas de hoja o foliares)

Fuente: Osorio y Lobo (1983); INFOAGRO citado por Cajo (2016)

La lechuga doméstica pertenece a la especie *Lactuca sativa*, la cual presenta dos variedades botánicas; lechugas de hoja suelta y las lechugas de cabeza. La primera corresponde a la variedad botánica Crispa y la segunda, a la variedad Capitata (Jaramillo *et al.*, 2016).

El 70 por ciento del total de nutrientes es absorbido por la planta durante los 21 días anteriores a la primera cosecha. Una excesiva cantidad de nitratos en el último tercio del ciclo tiende a forzar el crecimiento y produce cabezas flojas (Maroto, Montes y Holle citados por Ramírez, 1997).

2.2.2. EFECTOS DE DEFICIENCIA NUTRICIONAL

En nutrición vegetal, para que un elemento puede ser absorbido por las raíces de las plantas debe encontrarse en forma soluble en la solución acuosa que rodea las raíces. La forma disponible para la mayoría de elementos en solución es como ión; sin embargo, algunas formas moleculares de los elementos también pueden ser absorbidas como la urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (forma soluble de nitrógeno), el ácido bórico H_3BO_3 y algunos complejos quelatados

(FeDTPA). El término utilizado comúnmente para referirse a los elementos esenciales para el crecimiento de plantas es nutriente o nutriente mineral (Benton, 2014).

En hidroponía, la solución nutritiva consiste en agua con oxígeno y en los nutrientes esenciales en forma iónica, ésta es parte fundamental del cultivo ya que de ella depende la nutrición de las plantas y por ende, la calidad y cantidad de la producción (Lara, 1999). El estado de deficiencia de un nutriente mineral de una planta o cultivo, se puede determinar por la concentración de los elementos esenciales en las hojas, antes que el déficit de uno de ellos se manifieste a través de síntomas visuales. Además, si un elemento esencial se encuentra en menor concentración que el óptimo, afectará la tasa de crecimiento convirtiéndose en un factor limitativo. Es decir, el crecimiento vegetal estará determinado por el elemento o factor que se encuentre en menor proporción (Beltrano y Gimenez, 2015).

En un principio los síntomas de problemas nutricionales en las plantas son visibles solamente en las hojas más viejas, en etapas posteriores estas señales se extienden a toda la planta. Los síntomas visibles en la apariencia del cultivo son: decoloración, clorosis, necrosis y deformación (Garbanzo, 2012). Los síntomas que presentan las lechugas debido a la deficiencia de algunos nutrientes son descritos a continuación:

a. NITRÓGENO

Las plantas absorben el nitrógeno en forma de ion nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), cuando no se encuentran en las cantidades óptimas se produce una reducción en el crecimiento de la planta y las hojas se tornan amarillas (clorosis) debido a la pérdida de la clorofila. Asimismo, la planta deja de crecer tan pronto como empiezan adquirir un color amarillo pálido (Marulanda 2003). Las raíces también modifican su crecimiento ante la deficiencia de N, ya que se extienden en longitud y son más frágiles y delgadas. En situaciones de toxicidad por exceso de disponibilidad de nitrógeno en los cultivos hidropónicos, se registran quemaduras en los bordes de las hojas inferiores (Beltrano y Gimenez, 2015).

b. FÓSFORO

La deficiencia de fósforo se manifiesta inicialmente por una coloración verde oscura, con tintes púrpuras. El crecimiento es lento y se retrasa el acogollado; en fases avanzadas la deficiencia evoluciona a necrosis total de la hoja (Rincón citado por Jaramillo, 2016).

c. POTASIO

Black citado por Martínez y Garcés (2010) refiere que la falta de potasio puede causar crecimiento retardado; Maroto citado por La Rosa (2015) indica que las plantas con deficiencia de potasio presentan hojas gruesas con un necrosamiento en los bordes que puede llegar a afectar a las zonas interneviales, además las raíces no se desarrollan adecuadamente y las plantas no logran acogollar.

d. MAGNESIO

El magnesio es un nutriente esencial en la fotosíntesis de la lechuga. No es frecuente su deficiencia, si las soluciones nutritivas aseguran una concentración de 48,6 - 53,5 ppm de este catión (Gutiérrez citado por Jaramillo, 2016).

Los primeros síntomas de deficiencia se hacen visibles en las hojas exteriores, ya que es un elemento móvil. Primero, en las hojas jóvenes parece clorosis intervenal que va desde el centro hasta el borde las hojas. En estado adulto de la planta se produce un punteado necrótico no generalizado llegando a formar manchas necróticas. En carencia severa la mayoría de hojas presentan coloración amarilla con el nervio central de color verde claro (Rincón citado por Jaramillo, 2016).

e. HIERRO

La deficiencia de hierro genera un color pálido amarillento de las hojas, inicialmente se visualiza en la parte superior de la planta, aunque haya cantidades apropiadas de nitrógeno en la solución nutritiva. Además, ocasiona una banda de color claro en el borde de las hojas y formación de raíces cortas y muy ramificadas (Marulanda, 2003).

f. CALCIO

Los primeros síntomas de deficiencia de calcio se presentan por una reducción del crecimiento, el cual es visualizado en hojas jóvenes que crecen en forma de roseta, con presentación de una coloración más oscura que lo normal; algunas de ellas muestran forma de gancho. En estados avanzados las hojas aparecen totalmente cloróticas y los órganos más próximos a las regiones meristemáticas se ven fuertemente afectados; terminado el crecimiento de los mismos, lo que da la impresión de que la planta ha sido cortada a esa altura. Las hojas y tallos de los ápices se necrosan y mueren (Rincón citado por Jaramillo, 2016).

g. AZUFRE

El azufre es uno de los componentes de algunos aminoácidos, compuestos de sabor. Su deficiencia genera clorosis general de hojas jóvenes y reducción del crecimiento (Sierra *et al.*, 2007; Gordillo, 2017).

h. MANGANESO

La deficiencia de manganeso suele observarse en las hojas jóvenes. Aparecen bajo la forma de decoloraciones, que van desde verde pálido a amarillo o manchas cloróticas entre las nerviaciones (Mollehuanca, 2019).

2.2.3. ANTAGONISMO Y COMPETENCIA DE NUTRIENTES

La nutrición vegetal se basa en las interacciones iónicas que ocurren cuando el suministro de un nutriente afecta la absorción, distribución o función de algún otro: esta interacción puede modificar el crecimiento y rendimiento del vegetal. Esto es conocido como antagonismos y sinergismos entre los diferentes elementos (CSR Servicios, 2008; Robson y Pitman citados por Rietra *et al.*, 2017).

El antagonismo consiste en que el aumento por encima de cierto nivel de la concentración de un elemento reduce la absorción de otro. En cambio, el sinergismo ocurre cuando el aumento en la concentración de elemento favorece la absorción de otro (CSR Servicios, 2008).

La producción en cultivos hidropónicos puede estar influenciada por factores como la relación mutua entre los cationes, la relación mutua entre los aniones, la concentración de nutrientes, el pH y la temperatura (Lara, 1999). En la Tabla 5 se muestran los nutrientes que ocasionarían deficiencias inducidas en otros nutrientes.

Tabla 5: Antagonismos comunes de elementos que ocurren en cultivos en general

Nutriente en exceso	Deficiencia inducida
NH ₄ , K, Ca, Mg o Na	NH ₄ , K, Ca o Mg
Ca	Mg
Mg	Ca
Ca	B
PO ₄	Fe, Mn, Zn o Cu
Fe	Mn
Mn	Fe
Cl	NO ₃
K	Cu
Zn	Cu

Fuente: Nelson citado por Zamora (2016), Beltrano *et al.* (2015)

El nitrógeno se ve afectada por excesos de cloro y a su vez disminuye la absorción de cationes esenciales como el potasio, calcio y magnesio. En el caso de fósforo, se recomienda una relación de N: P de 10:1; por otro lado altas concentraciones de zinc, altera el metabolismo del fósforo (Mills *et al.* citado por Ramirez *et al.*, 2009).

El potasio, debe estar en una relación 1:1 con el nitrógeno, para que mantener un rango adecuado en términos de nutrición de plantas, si esto no ocurre afecta la disponibilidad de nutrientes y por consiguiente la absorción de los mismos. Este desorden nutricional, se materializa en la coloración de las hojas y sus bordes. Por otro lado, existe una competencia entre el potasio, calcio, magnesio y sodio, ya que altas concentraciones de estos elementos reducen la absorción de potasio (Mills *et al.* citado por Ramirez *et al.*, 2009).

Con respecto al magnesio, su disponibilidad está altamente influenciada por el pH, y en valores inferiores a 5,5, esta se reduce notablemente, a la vez que su concentración disminuye la toma del manganeso (Mills *et al.* citado por Ramirez *et al.*, 2009).

2.2.4. CONCENTRACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA HIDROPÓNICA

En los sistemas hidropónicos las raíces de las plantas permanecen en solución hidropónica, la cual está formulada para el óptimo crecimiento de estas (Hannan citado por Licamele, 2009). El éxito de los cultivos hidropónicos radica en la composición de la solución nutritiva, pues la misma deberá contener todos los elementos esenciales en forma adecuada y cantidades apropiadas para el desarrollo de la planta, los cuales se clasifican en macronutrientes como el C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S, debido a que son requeridos en mayores cantidades y los micronutrientes como Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Ni y Cl, ya que estos son requeridos en menor cantidad (Beltrano *et al.*, 2015).

Las necesidades de nutrientes varían por especie y por variedad, particularmente de nitrógeno, fósforo y potasio. En la Tabla 6, se presenta el rango de concentración de nutrientes, para un desarrollo óptimo de cultivos de hoja en hidroponía.

Tabla 6: Rango de concentración óptima de nutrientes y forma de absorción para cultivos de hoja

Elemento	Concentración óptima (ppm o mg.L ⁻¹)	Forma de absorción
N	150-200	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
P	20-40	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ⁻
K	200-250	K ⁺
Ca	150-200	Ca ²⁺
Mg	30-50	Mg ²⁺
S	50-100	SO ₄ ⁻
Fe	0,5-2,0	Fe ²⁺ , Fe ³⁺
Mn	0,3-0,5	Mn ²⁺
B	0,3-0,5	B(OH) ₃
Zn	0,1-0,3	Zn ²⁺ , Zn(OH) ₂
Cu	0,1-0,2	Cu ²⁺
Mo	0,01-0,05	MoO ₄ ⁺

Fuente: Rodríguez citado por Mendoza (2015)

En los cultivos hidropónicos se debe considerar la relación entre los nutrientes, pues la interacción de dos elementos pueden ser sinérgicos a bajas concentraciones pero antagónicos a concentraciones elevadas (Beltrano y Gimenez, 2015). Además, se debe considerar que elementos como el sulfato deben ser incorporados en mínimas cantidades ya que al llegar a un nivel límite, inhibe la absorción de agua por las plantas (Carrasco e Izquierdo, 1996).

Diferentes autores han formulado soluciones nutritivas para el cultivo hidropónico de lechuga, los cuales presentan diferencias en las concentraciones de los nutrientes, estas fórmulas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Concentración de nutrientes (ppm o mg.L⁻¹) de diferentes soluciones nutritivas usadas en el cultivo hidropónico de lechuga

Elementos	Solución 1 Garzón (2006)	Solución 2 Garzón (2006)	La Molina	Club Hidroponía-UNT	Solución 1 Cajo (2016)	Solución 2 Cajo (2016)	Solución 3 Cajo (2016)
N	143	190	190	190	144	120	96
S	53	70	70*	84,38*	7,2	6	4,8
P	27	36	35	35	60	50	40
Ca	39	53	150*	150*	60	50	40
K	159	212	210	200	120	100	80
Mg	16	21	45*	37,08*	24	20	16
Fe	3,75	5	1	1	6	5	4
Mn	0,38	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4
Cu	0,02	0,02	0,1	0,19	0,02	0,02	0,02
B	0,38	0,5	0,5*	0,5	0,5	0,4	0,3
Zn	0,38	0,5	0,15	0,19	0,48	0,40	0,32
Mo	0,008	0,01	0,05	0,013	0,006	0,005	0,004

Fuente: Adaptado de Garzón (2006), Mendoza (2015), Cajo (2016)

*Incluye lo que aporta el agua.

Las soluciones nutritivas presentadas en la Tabla 7 fueron utilizadas en la fase final del cultivo hidropónico de lechuga, es decir, en el trasplante definitivo de plántula hasta la cosecha final. Mendoza (2015) obtuvo mejor rendimiento con la solución nutritiva La Molina, con 7,35 kg.m⁻², en sistema hidropónico raíz flotante para el cultivo de lechuga cv. *White Boston* que pertenece a la variedad *Capitata*, a diferencia de la solución Club hidropónico-Universidad Nacional de Trujillo (UNT), en el que obtuvo 4,84 kg.m⁻². En el estudio realizado por Garzón (2006), con tres variedades de lechugas *Vulcan*, *Parris* y *Verónica* en el sistema solución nutritiva recirculante usando dos soluciones diferentes para

cada variedad, obtuvo mejor rendimiento (0,92 kg.m⁻²) con la solución 2 para la variedad Parris. Por otro lado, Cajo (2016) evaluó tres soluciones nutritivas en tres variedades de lechuga (*crespa*, *lolla rossa* y *salad bowl*) en el sistema solución nutritiva recirculante, en el cual determinó que el mejor rendimiento se obtuvo con la solución 2 en la variedad *salad bowl*.

En términos generales, Castañeda citado por Bautista (2000), menciona que la lechuga ha sido cultivada en sistemas hidropónicos siendo duplicado los rendimientos obtenidos si es comparado con el cultivo en tierra. Los rendimientos van desde 2,32 a 6,5 kg.m⁻² comparado con los cultivos en tierra que van de 2 a 3,25 kg.m⁻², además la densidad de siembra se puede aumentar hasta en un 10 o 30 por ciento del cultivo convencional.

2.2.5. TOXICIDAD EN EL CULTIVO HIDROPÓNICO

En el cultivo hidropónico a pesar que el pH en un rango normal sea 6,5 a 8,5, el agua de cultivo puede contener ciertos iones que en concentraciones superiores a ciertos límites pueden causar problemas de toxicidad a las plantas. Ayers y Westcot citados por Favela *et al.* (2006) indican que los iones fitotóxicos más comunes que están presentes en el agua de cultivo son: boro (B), cloro (Cl⁻) y sodio (Na⁺) cuando se encuentran a concentraciones mayores a 5 mg.L⁻¹, también existen otros iones que pueden tener efectos negativos en los cultivos de plantas tal como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8: Niveles críticos de iones presentes en la calidad de agua para cultivo de plantas

Iones	Tipo de riesgo (mg.L ⁻¹)		
	Nulo	Medio	Alto
Cloruros	<2	2-10	>10
Boro	<1	1-2	>2
Zinc	-	-	>2
Cobre	-	-	>0.2
Hierro	-	-	>5
Molibdeno			>0.01
Manganeso			>0.2

Fuente: Favela *et al.* (2006)

Los síntomas de toxicidad por boro como deformaciones y quemaduras en plantas sensibles se presentan en concentraciones mayores a 1 mg.L^{-1} (Rojas *et al.*, 2016).

La toxicidad por cloro influye en la absorción de nitrato el cual es fundamental para el crecimiento de las plantas (Mills *et al.* citado por Ramirez *et al.*, 2009). Los excesos de este nutriente producen el quemado de los bordes y extremos de las hojas, poco desarrollo y reducción del tamaño del vegetal (Marulanda, 2003).

Los síntomas típicos del sodio aparecen en forma de quemaduras o necrosis a lo largo de los bordes de las hojas. En términos generales, se considera que una concentración de sodio en el agua de riego inferior a 60 mg.L^{-1} no presenta restricciones en su uso; entre 60 y 70 mg.L^{-1} presenta moderadas restricciones y sobre 70 mg.L^{-1} presenta serias restricciones (Barros, s.f.).

2.3. SISTEMAS ACUAPÓNICOS

La acuaponía es la combinación del cultivo de plantas y peces en sistemas de recirculación, el cual ha tomado importancia en las últimas décadas. Esta técnica se basa en reutilizar los efluentes del cultivo de peces para la producción de plantas hidropónicas, ya que las raíces de las plantas remueven los nutrientes contenidos en el agua para mantener niveles adecuados para el cultivo de peces, debido a esto el recambio de agua y la contaminación disminuyen el uso de agua (Pérez *et al.*, 2015). García -Ulloa *et al.* (2004) indican que el principio básico de estos sistemas radica en el aprovechamiento de la energía del sistema para utilizar diferentes formas por los componentes comerciales que desean producirse. Por lo tanto, los sistemas acuapónicos trabajan sobre dos puntos de gran utilidad en producción, rentabilidad y tratamiento de desechos (Rakocy citado por Caló, 2011).

Datta (2015) y Pérez *et al.* (2015) indican que los sistemas acuapónicos consisten principalmente de dos componentes (componente acuícola y componente hidropónico); sin embargo, comúnmente son agrupados en diferentes subsistemas responsables de la remoción efectiva de los desechos sólidos. Los componentes característicos incluyen (a) tanque de cultivo, componente donde crecen y se alimentan a los peces; (b) remoción de sólidos,

unidad para eliminar los alimentos no consumidos y la biopelícula desprendida y sedimentos finos; (c) biofiltro, lugar donde las bacterias de nitrificación pueden desarrollarse y convertir el amoníaco en nitratos, el cual será aprovechado por las plantas; (d) subsistemas hidropónicos, componente del sistema donde crecerán las plantas absorbiendo el exceso de nutrientes del agua; (e) sumidero, es el punto más bajo del sistema donde el agua fluye y es bombeado de retorno a los tanques de cultivo, el sistema se ilustra en la Figura 1.

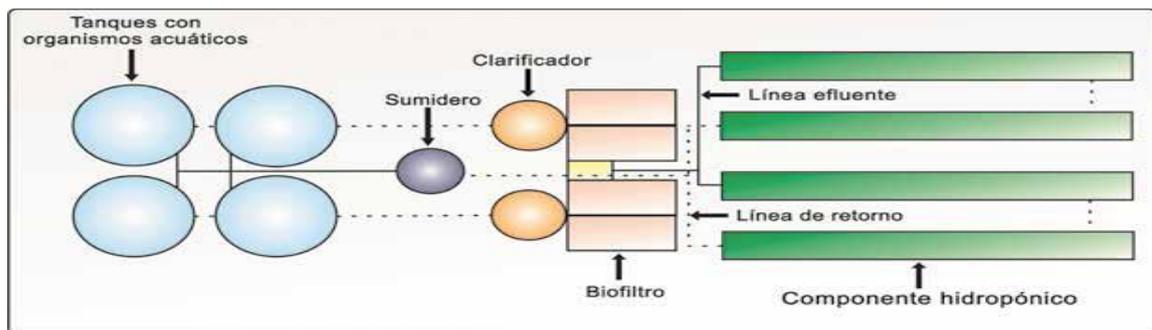


Figura 1: Configuración de un sistema de recirculación de acuaponía, Rakocy *et al.* (2006)

2.3.1. EL CICLO DEL NITRÓGENO EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

El principio acuapónico se basa en el ciclo del nitrógeno y cuenta con tres constituyentes biológicos importantes: los peces, las bacterias nitrificantes y las plantas, los cuales se encuentran en una estrecha relación (Merlín y Martínez, 2015).

Rakocy *et al.* (2006), afirman que las plantas crecen rápidamente con los nutrientes disueltos que son eliminados directamente por los peces o generados por la descomposición bacteriana de los desechos producidos por estos. En sistemas de recirculación cerrados con poco recambio de agua (menos del dos por ciento), los nutrientes disueltos se acumulan en concentraciones similares a las soluciones nutritivas usados en hidroponía. El nitrógeno disuelto, en particular, puede estar presente en altos niveles dentro de los sistemas de recirculación.

La nitrificación, la conversión aeróbica de amoníaco a nitratos (Figura 2), es una de las funciones más importantes en un sistema de acuaponía, ya que reduce la toxicidad del agua

para los peces, y permite que los compuestos de nitrato resultantes sean eliminados por las plantas para su nutrición. El amoníaco es desprendido constantemente en el agua por excreción y branquias del pez como un producto de su metabolismo, pero la mayoría debe ser filtrada del agua puesto que grandes concentraciones de amoníaco (comúnmente entre 0,5 y 1 mg.L⁻¹ o ppm) puede matar al pez. Aunque las plantas, hasta cierto grado, pueden absorber amoníaco del agua aunque los nitratos son más fácilmente asimilados, así eficazmente reducen la toxicidad del agua para los peces. El amoníaco puede ser convertido en otros componentes nitrógenos a través de poblaciones saludables de: (1) nitrosomas, bacterias que convierten amoníaco en nitritos, y (2) nitrobacteria, bacterias que convierten nitritos en nitratos (Pérez *et al.*, 2015). Para este proceso se requiere de una alta disponibilidad de oxígeno disuelto (Carsiotis y Khanna, Madigan y Matinko, Shoda citados por Eck *et al.*, 2019)

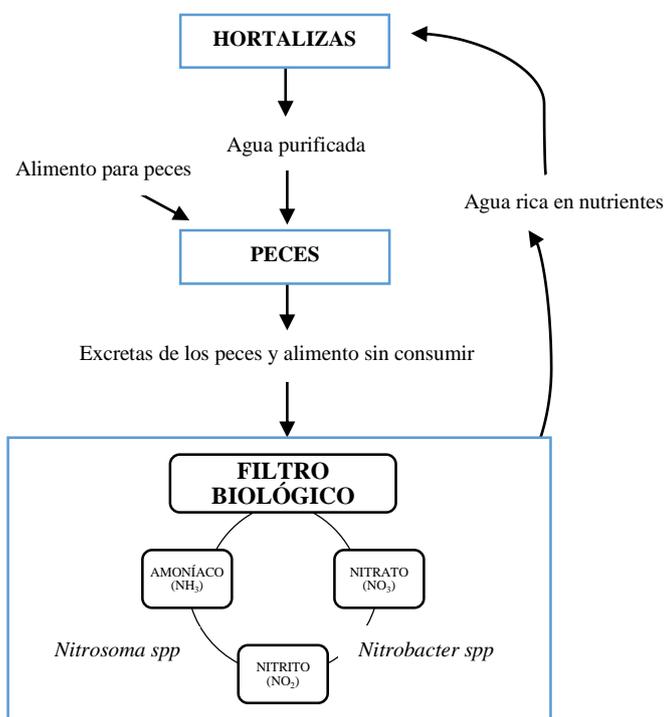


Figura 2: Representación del ciclo del nitrógeno en un sistema acuapónico (Goodman citado por Bañuelos, 2017)

2.3.2. TIPOS DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Los tipos de sistemas acuapónicos se basan en la técnica utilizada para el cultivo de plantas, estas se originan de los cultivos hidropónicos, la diferencia está en que el agua utilizada en los sistemas acuapónicos proviene del tanque de los peces y finalmente retorna al mismo (Connolly y Trebic, 2010). Lara (1999) menciona que las técnicas hidropónicas se clasifican en función del medio de crecimiento de la planta (sistema radical).

a. SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE O BALSAS FLOTANTES

Es uno de los sistemas más comerciales. Este sistema consiste en colocar contenedores con solución nutritiva (efluente de peces), en el cual las raíces están permanentemente en ésta sostenidas por una plancha de poliestireno perforada que actúa como soporte mecánico, como se observa en la Figura 3. Debido a su funcionamiento, esta técnica permite utilizar una alta carga de peces, generando mejores rendimientos económicos en el componente acuícola (Pérez citado por Morgado, 2014).

Una de las ventajas de esta técnica es que, debido al constante flujo de agua, la absorción de nutrientes es alta. Por otro lado, la limpieza y mantenimiento es más fácil comparado con los otros sistemas (Rakocy *et al.* citados por Delaide, 2017).

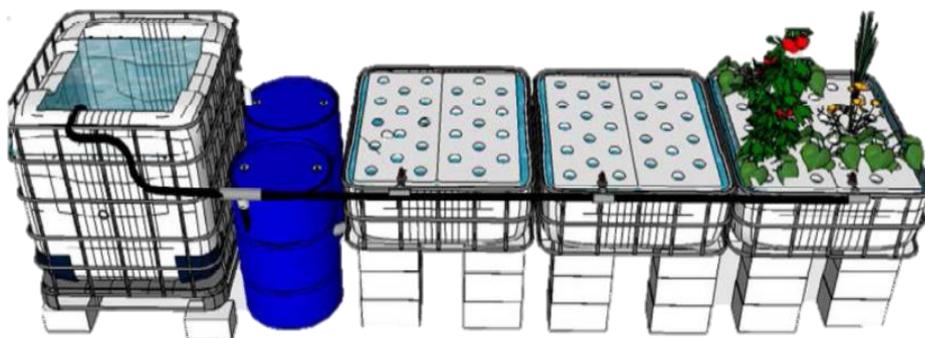


Figura 3: Diseño a menor escala de un sistema de raíz flotante o balsas flotantes; Somerville (2014)

b. SISTEMA DE SOLUCIÓN NUTRITIVA RECIRCULANTE

El sistema de solución nutritiva recirculante es el método más utilizado en hidroponía. En este sistema las raíces de las plantas se mantienen en contacto con una delgada

película de agua que contiene los nutrientes (Figura 4). En acuaponía, esta técnica necesita un sistema de clarificación mucho más efectivo ya que las partículas podrían taponar los canales y cubrir las raíces, impidiendo la absorción de nutrientes (Ramírez *et al.*, 2008).

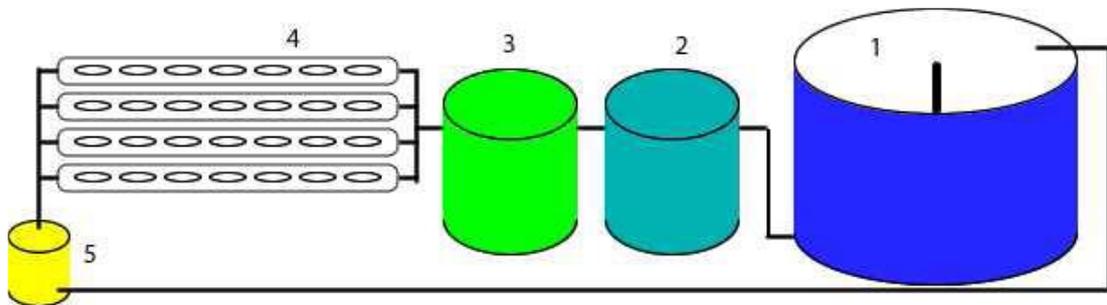


Figura 4: Diseño genérico de un Sistema de solución nutritiva recirculante. Referencias: 1. Tanque de peces; 2. Filtro mecánico; 3. Filtro biológico; 4. Componente hidropónico; 5. Sumidero con bomba; Caló (2011)

c. SISTEMA EN CAMAS CON SUSTRATO

Este sistema consiste en colocar un sustrato inerte, en contenedores de aproximadamente 30 cm de profundidad, que sirve de sostén a las plantas, como se ilustra en la Figura 5. El flujo del agua ingresa por uno de los extremos y egresa por el opuesto, retornado así al reservorio (Caló, 2011).

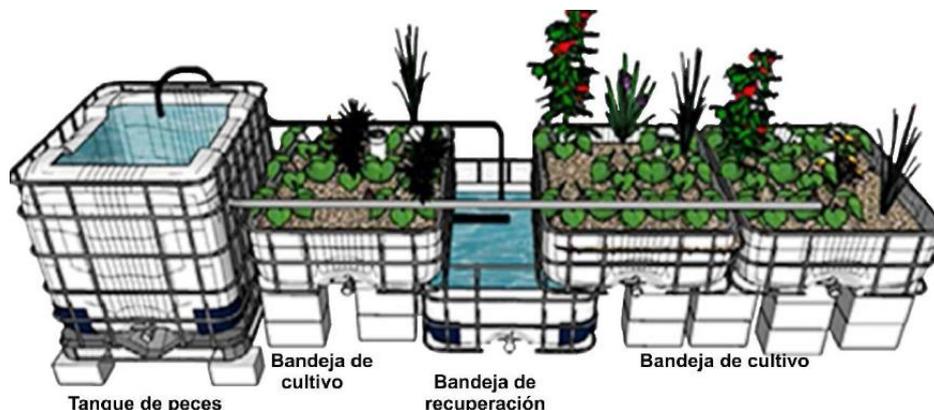


Figura 5: Diseño a menor escala de un sistema en camas con sustrato, Somerville (2014)

2.3.3. VENTAJAS DEL SISTEMA ACUAPÓNICO

Los sistemas acuapónicos pueden proporcionar alimentos durante todo el año, incluyendo la estación seca, en lugares áridos donde los recursos agua y suelo pueden ser escasos y pueden actuar como la clave para el autoabastecimiento de las comunidades en las regiones en vías de desarrollo (Hughey citado por Bañuelos, 2017).

Una de las ventajas del sistema acuapónico es la bioseguridad, ya que el cultivo de los peces es sistemas cerrados, lo que permite el control y operación sin el uso de químicos, medicinas o antibióticos. Esto asegura productos más naturales para los consumidores (Datta, 2015)

En términos de eficiencia de los recursos, los sistemas acuapónicos usan solo el 1 por ciento de recambio de agua requerida en cultivos de peces tradicionales (Diver citado por Bañuelos, 2017).

2.3.4. CALIDAD DE AGUA EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

La calidad de agua en los sistemas acuapónicos se basa principalmente en los parámetros oxígeno disuelto, pH, temperatura, nitrógeno total y alcalinidad. Debido a que cada uno de los mencionados tiene un impacto sobre los organismos involucrados en el sistema (peces, plantas y bacterias) (Somerville *et al.*, 2014). En la Tabla 9, se observa los rangos de tolerancia para los tres componentes vivos por separado y en la Tabla 10, se indica los valores óptimos en los que debe funcionar un sistema acuapónico.

Tabla 9: Rangos generales de tolerancia de calidad de agua para peces (aguas cálidas o aguas frías), plantas hidropónicas y bacterias nitrificantes

Organismos	Temperatura (°C)	pH	Amonio (mg.L ⁻¹)	Nitrito (mg.L ⁻¹)	Nitrato (mg.L ⁻¹)	Oxígeno disuelto OD (mg.L ⁻¹)
Peces aguas cálidas	22-32	6-8,5	<3	<1	<400	4-6
Peces aguas frías	10-18	6-8,5	<1	<0,1	<400	6-8
Plantas	16-30	5,5-7,5	<30	<1	-	>3
Bacteria	14-34	6-8,5	<1	<1	-	4-8

Fuente: Somerville *et al.* (2014)

Tabla 10: Parámetros ideales para acuaponía entre los tres organismos (peces, plantas y bacterias)

	Temperatura (°C)	pH	Amonio (mg.L ⁻¹)	Nitrito (mg.L ⁻¹)	Nitrato (mg.L ⁻¹)	Oxígeno disuelto OD (mg.L ⁻¹)
Acuapónicos	18-30	6-7	<1	<1	5-150	>5

Fuente: Somerville *et al.* (2014)

a. OXÍGENO

Oxígeno es esencial para los tres organismos involucrados en el sistema acuapónico; plantas, peces y bacterias. Este es el parámetro de calidad de agua que tiene efectos inmediatos y drásticos en un sistema acuapónico (Somerville, 2014). Por consiguiente, al existir una baja concentración de oxígeno en el sistema, no se realizará una buena nitrificación; restando desechos metabólicos sin filtrar y acumulándose en concentraciones tóxicas para los peces. Los peces y plantas ante la ausencia de oxígeno disminuyen su crecimiento, y en caso de los peces, pueden dejar de alimentarse llevándolos hasta la muerte. Un buen momento para la medida del oxígeno, es después de alimentar, cuando el metabolismo de los peces se incrementa (Caló, 2011).

b. pH

El pH tiene un impacto importante en todos los aspectos de un sistema acuapónico, especialmente en las plantas y bacterias. Para las plantas, el pH controla el acceso de estas a micronutrientes y macronutrientes, siendo un nivel óptimo de 6 - 6,5 donde todos los nutrientes están fácilmente disponibles, de lo contrario, los nutrientes se vuelven difíciles de acceder a las plantas. A pH de 7,5 puede generar deficiencias de nutrientes como hierro, fósforo y manganeso (Somerville, 2014).

Por otro lado, las bacterias nitrificantes experimentan dificultades por debajo de un pH de 6, y la capacidad de la bacteria para convertir amoníaco en nitrato se reduce en condiciones ácidas y de bajo pH, reduciendo la biofiltración, por lo tanto, los niveles de amoníaco pueden comenzar a aumentar, lo que lleva a un sistema desequilibrado estresante para los otros organismos (Somerville, 2014). Por último, el pH debe ser adecuado para la especie de pez que se desee cultivar, siendo en general, valores dentro

de un rango de 7 a 7,5 para todas las especies (Caló, 2011) y específicamente la especie tilapia tolera grandes fluctuaciones de pH dentro de un rango de 3,7 a 11, pero logra mejores rendimientos de crecimiento entre 7 y 9 (El-Sayed, 2006).

c. TEMPERATURA

La temperatura del agua afecta a todos los aspectos del sistema acuapónico. En general, un rango óptimo es de 18-30°C. Este parámetro tiene un efecto en el oxígeno disuelto, así como sobre la toxicidad (ionización) del amoníaco; altas temperaturas presentan menos oxígeno disuelto y más amonio no ionizado (tóxico). Además, las altas temperaturas pueden restringir la absorción de calcio en las plantas (Somerville, 2014).

Por otro lado, la temperatura influye en la disponibilidad de nutrientes ya que a mayores temperaturas, el metabolismo de los peces se acelera y por lo tanto resulta en mayor contenido de nutrientes en la fracción sólida de las heces (Turcios y Papenbrock citados por Eck *et al.*, 2019).

d. NITRÓGENO TOTAL: AMONIO, NITRITO, NITRATO

El nitrógeno es el cuarto parámetro crucial de la calidad de agua. Es requerido por toda la vida, y forma parte de todas las proteínas. Este elemento entra originalmente en el sistema acuapónico a partir de la alimentación de los peces, usualmente etiquetada como proteína cruda y medida como un porcentaje. Algunas de estas proteínas son usadas por el pez para crecer, y el resto liberado como desecho. Este residuo está en mayor parte en forma de amonio no ionizado (NH_3) y se libera a través de las branquias y orina (Somerville, 2014). El amonio no ionizado es extremadamente tóxico para los peces, y su cantidad depende del pH y la temperatura del agua. Diferentes estrategias de filtración biológica han sido utilizadas para el control del NAT, inclusive la utilización de minerales como la zeolita que han sido evaluados con resultados alentadores (Rafiee citado por Caló, 2011).

Los nitritos son un producto intermedio en el proceso de nitrificación y así como el amonio no ionizado, son tóxicos también en concentraciones relativamente bajas, dependiendo de la especie a cultivar. Concentraciones de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ son estresantes para

el *channel catfish* (*Ictalurus punctatus*), mientras que concentraciones de cinco mg.L^{-1} parecen causar un ligero estrés en el caso de la tilapia (Masser citado por Caló, 2011).

Los niveles de nitrato pueden ser regulados dentro de un rango de 1 a 100 mg.L^{-1} a más. Altas concentraciones de nitrato promueven el crecimiento de vegetales de hoja verde, mientras que las bajas concentraciones promueven el desarrollo de frutos en vegetales como el tomate (Rakocy *et al.*, 2006)

e. ALCALINIDAD

Los Carbonatos y Bicarbonatos, representan una medida de amortiguación de la alcalinidad del agua, también conocido como el poder “buffer” del agua, contra los potenciales descensos de la misma y sus consecuencias. La nitrificación es un proceso que produce ácido y consume alcalinidad, por esta razón comúnmente, se deben agregar bases para mantener valores estables en el pH del agua (Rakocy, 2006).

Las bases que comúnmente se usan para el incremento de la alcalinidad son el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de calcio (Ca (OH)_2); sin embargo, una solución más segura y fácil es el carbonato de calcio (CaCO_3) o carbonato de potasio (K_2CO_3), lo cual incrementa tanto el pH como la alcalinidad. La elección de las bases y buffers dependen del tipo de plantas en el sistema, ya que estos componentes adicionan un importante macronutriente. Los vegetales de hoja pueden favorecerse con bases de calcio para evitar el quemado (*tip burn*) en las hojas; mientras que el potasio en plantas de fruto favorece el florecimiento y maduración de estos (Somerville *et al.*, 2014).

El bicarbonato de sodio es frecuentemente usado para incrementar la alcalinidad en sistemas de recirculación, pero no debe ser usado en sistemas acuapónicos porque aumenta la concentración de sodio, el cual es perjudicial para las plantas (Somerville *et al.*, 2014).

La estabilidad del pH en el sistema es un punto crucial ya que es crítico para todos los organismos vivos que incluye peces, plantas y bacterias (Delaide 2017). Se necesita

garantizar una fuente de agua con relativa alcalinidad en las renovaciones de agua que se realicen en el sistema, a fin de evitar su acidificación. Se considera apropiado mantener una concentración de entre 60-140 mg.L⁻¹ CaCO₃ para un sistema acuapónico (Candarle, s.f.).

2.3.5. NUTRIENTES DEFICITARIOS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Los sistemas acuapónicos se diferencian de los cultivos hidropónicos en que los nutrientes son constantemente generados en relación con el alimento que ingresa al sistema. Las tasas de nutrientes esenciales son apropiadas para el buen crecimiento de las plantas, a excepción de calcio, potasio y hierro, los cuales tienen que ser suplementados (Rakocy, 2004).

La acumulación excesiva de nutrientes en un sistema acuapónico es importante tener un control, ya que tasas de alimentación altas, intercambio de agua bajo y áreas de cultivo insuficientes pueden llevar a la acumulación rápida de sólidos disueltos totales (SDT) a niveles potencialmente fitotóxicos (>2,000 mg.L⁻¹ como SDT o 3125 micromhos.cm⁻¹). En trabajos realizados en la Universidad de las Islas Vírgenes (UVI) demostraron que las medidas de conductividad de los SDT aumentaron constantemente mientras se incrementaba la cantidad de alimento adicionada al sistema, con 10 kg de alimento.m⁻³ de volumen de sistema se alcanzaron niveles fitotóxicos. (Rakocy, 2002).

Los principales nutrientes que contribuyen al incremento de la conductividad son nitrato (NO₃), fosfato (PO₄), sulfato (SO₄), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). De estos, NO₃ se acumula a la tasa más alta y la tasa de acumulación PO₄ y SO₄ son menores, estos resultados fueron obtenidos en los trabajos realizados en UVI. Sin embargo, la acumulación de K y Ca se debe a la adición de estos, pues los niveles de K y Ca generados por los desechos de los peces son insuficientes para el crecimiento máximo de la planta (New Alchemy Institute, Head, McMurtry, Parker *et al.*, Rakocy citados por Rakocy, 2002). A diferencia de los nutrientes mencionados, los micronutrientes hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), molibdeno (Mo) y boro (B) no se acumulan con respecto al alimento acumulativo que ingresa al sistema, aunque zinc (Zn) si se acumula. El hierro derivado del alimento de peces es insuficiente para la producción hidropónica vegetal y debe ser añadido al sistema (Rakocy, 2002).

Por otro lado, el fósforo es un macronutriente que es asimilado por las plantas en su forma de ortofosfato iónico (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}). Es esencial para las fases vegetativas y de floración de las plantas. En sistemas de recirculación cerrado, el 30 a 65 por ciento del fósforo es añadido al sistema a través de la alimentación de los peces y se pierde en forma de excreción que es filtrada por los tanques de sedimentación o filtros mecánicos. Además, el fósforo orgánico solubilizado como ortofosfato puede precipitar con calcio haciendo que estos elementos estén menos disponibles en la solución. Consecuentemente, los trabajos realizados en acuaponía reportan un rango de 1 a 17 mg.L^{-1} $\text{PO}_4\text{-P}$, las cuales difieren de las concentraciones recomendadas en hidroponía (40 y 60 mg.L^{-1} $\text{PO}_4\text{-P}$). Estas diferencias sugieren que se debe añadir fosfato a los sistemas acuapónicos especialmente en hortalizas de fruto (Delaide, 2017).

Las concentraciones de nutrientes obtenidas en sistemas acuapónicos de lechuga y tilapia de diferentes estudios se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Concentraciones de nutrientes en sistemas acuapónicos de cultivo de tilapia y lechuga, todos los nutrientes son reportados en mg. L^{-1}

pH	Ca	Mg	Na	K	NO_3^- N	PO_4^- P	SO_4^- S	Densidad de peces (kg. m^{-3})	Autor
8				48	20	10			Al-Hafedh <i>et al.</i> citados por Delaide (2017)
	180	44	17	106	137	9			Pantanella <i>et al.</i> citados por Delaide (2017)
	25	38			25	6		10	Pineda-Pineda <i>et al.</i> (2018)

Otros autores como Nozzi *et al.* (2018) compararon durante 30 días la concentración de nutrientes en el cultivo acuapónico de lechuga, menta y champiñón con diferentes suplementos de nutrientes. Para ello instalaron 3 sistemas acuapónicos con diferentes aplicaciones: Sistema A, los nutrientes derivaron exclusivamente de los efluentes del cultivo de tilapia; Sistema B, los nutrientes fueron derivados de los efluentes del cultivo de tilapia adicionando cada semana suplemento de micronutrientes (Zn, B, Mn, Mo y Cu) y hierro; Sistema C, los nutrientes suplementados fueron igual que el sistema B además de los

macronutrientes K, P, Mg y S; y finalmente el sistema D (control), compuesto por el cultivo hidropónico con las mismas especies de vegetales con solución nutritiva que contenía los mismos micronutrientes y macronutrientes adicionados al sistema C además de N y Ca. Para el mantenimiento del pH en 6,5, en los sistemas A, B y C se utilizó hidróxido de potasio (KOH) mientras que en sistema C se utilizó ácido nítrico (HNO₃) al 16por ciento para mantener el pH a 6. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Concentración promedio de nutrientes en cada sistema del experimento

Nutrientes	Objetivo	A	B	C	D
	(Concentración)				
NO ₃ -N, mg.L ⁻¹	60	84	62	82	63
PO ₄ -P, mg.L ⁻¹	35	3,5	1,9	28	28
K, mg.L ⁻¹	150	48	35	146	123
Fe, mg.L ⁻¹	3	0,1	1,8	2,1	2,3
Ca, mg.L ⁻¹	130	90	74	74	117
Mg, mg.L ⁻¹	40	15	11	32	35

Fuente: Nozzi *et al.* (2018)

2.3.6. PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y LECHUGAS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Los sistemas acuapónicos son generalmente diseñados para cumplir con los requisitos de tamaño para la remoción de sólidos (para aquellos sistemas que requieren eliminación de sólidos) y biofiltración para la cantidad de peces que serán cultivados. Después del cálculo del tamaño, es necesario añadir el exceso de capacidad como margen de seguridad. Sin embargo, si se utiliza el biofiltro, el componente hidropónico es el factor de seguridad porque una cantidad significativa de absorción de amoníaco y nitrificación ocurrirá independientemente de la técnica hidropónica (Rakocy *et al.*, 2006).

Ramírez *et al.* (2008) afirma que un sistema acuapónico que no haya desarrollado completamente su población bacteriana, y por lo tanto sus capacidades de biofiltración no son las adecuadas, muestra una producción baja comparada con sistemas hidropónicos orgánicos. Sin embargo, si permanece el tiempo suficiente (caso reportado seis meses), la

acuaponía genera una mayor producción que la hidroponía. Asimismo, se debe tener en cuenta que fuera de las plantas, en acuaponía se genera otro producto (los peces), que dependiendo de la especie empleada puede incrementar los ingresos que se perciben utilizando estos sistemas.

Sistemas acuapónicos iniciales estuvieron basados en la proporción de 1:1, pero 1:2 es utilizada comúnmente y una alta proporción tanque: cama hidropónica como 1:4 son actualmente empleadas. La variación en el rango depende del tipo de sistema hidropónico (grava o raíces flotantes), especies de peces, densidad del pez, tasa de alimentación, especie de planta y otros (Diver, 2006).

Licamele (2009) basado en el estudio realizado por Fitzsimmons (1992), en el cual indica que para producir 20 unidades de lechuga en sistemas acuapónicos se necesita entregar un kilogramo de alimento para peces, experimentó con diferentes densidades de peces, con peso promedio de $202,68 \pm 30,35$ g. Las densidades usadas fueron 2, 5 y 8 kg.m^{-3} , cada tratamiento recibió 40 g, 100 g y 160 g de alimento para peces con 32 por ciento de proteína y tasa de alimentación de dos por ciento de la biomasa por día, respectivamente. El sistema hidropónico usado fue de raíces flotantes con una densidad de 32 lechugas por metro cuadrado. Finalmente, determinó que con 5 kg.m^{-3} de tilapia con una tasa de alimentación de dos por ciento cosechó en promedio 4,7 kg de lechuga en 35 días, siendo este resultado mayor comparado con los otros tratamientos.

En el estudio realizado por Moreno (2014), se evaluó la producción de lechuga en un sistema acuapónico usando la técnica de NFT, con dos cantidades diferentes de peces (50 y 25), para la producción de 50 lechugas, obteniendo mayor rendimiento con mayor cantidad de peces. Además, registró la longitud de raíz obteniendo 16,6 cm en el sistema acuapónico con 50 peces y 16,4 cm con menor cantidad de peces (25).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR Y FECHA DE EJECUCIÓN

El estudio experimental se realizó en el módulo acuapónico ubicado en las instalaciones del Centro de Investigación Piscícola (CINPIS), de la Facultad de Pesquería, de la Universidad Agraria La Molina, ubicado en el distrito La Molina. El período de investigación se llevó a cabo en tres etapas durante los meses de agosto a diciembre del 2017.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El área experimental consistió en tres sistemas acuapónicos iguales compuestos por un tanque de cultivo, un filtro mecánico, un filtro biológico, una cama hidropónica y un tanque de reserva, el volumen total de cada sistema fue 1,569 m³ (Figura 6).

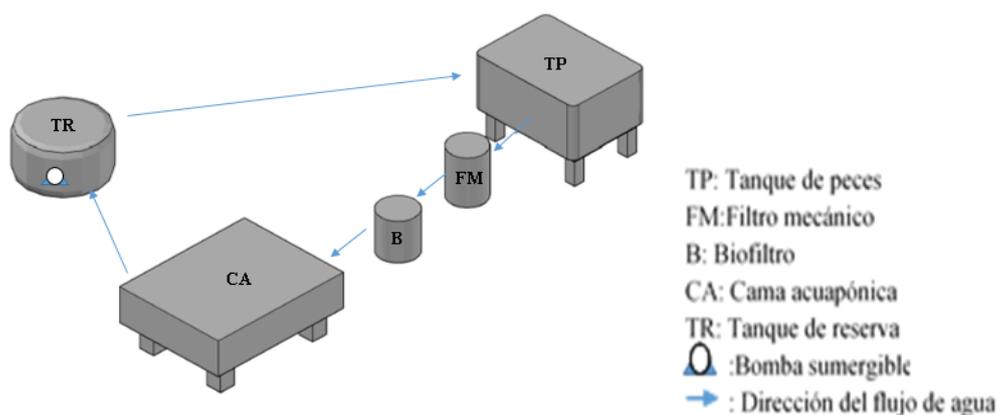


Figura 6: Esquema del sistema acuapónico del trabajo de investigación.

3.2.1. TANQUES DE PECES

Los tanques de cultivo de peces fueron de cemento (0,86 m x 1,05 m x 0,6 m) con un volumen de 0,423 m³ y una base de soporte 0,903 m² y 0,6 m de altura en los cuales se realizó la crianza de tilapia.

Los tanques de cultivo contaron con una piedra difusora, en el fondo de los mismos, para garantizar la oxigenación del agua a través de un compresor de aire de 112 W del cual conectaban manguerillas de silicona. Además, se colocó un calentador de 300 W en cada tanque de cultivo para elevar la temperatura del agua, en la época de invierno, hasta lo recomendado para el cultivo de tilapia (24-30°C). Ver Figura 7.



Figura 7: Tanques de los peces del Sistema acuapónico.

3.2.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA, CAMAS ACUAPÓNICAS

El filtro mecánico estuvo constituido por un cilindro de plástico con un volumen de 95 litros con entradas y salidas de agua mediante tubos de pvc de $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

El filtro biológico o biofiltro estuvo conformado por un cilindro de plástico de 44 litros de capacidad, el cual contenía una base de cerámica filtrante, tubos corrugados de pvc y cilindros de plástico de aproximadamente 6 cm de largo con orificios en su superficie. En la parte superior del cilindro se colocó un tamiz de plástico con una fibra sintética de poliamida que cubrió la base de este, además contó con una piedra difusora para mantener una aireación constante.

La cama acuapónica con capacidad de $0,405\text{m}^3$ estuvo conformado por una estructura de madera (1,40 m x 1,05 m x 0,37 m) cuyo interior estuvo revestido con geomembrana de color negro, en tanto en la superficie de ésta se colocó poliestireno expandido de una pulgada

de espesor perforado cada 20 cm con una separación triangular, donde se colocaron las canastillas plásticas de sujeción para las plántulas de lechugas (Figura 8).

El tanque de reserva de capacidad de 0,6 m³ contó con una bomba sumergible de 130 W, marca Hailea, que permitió el retorno del agua a los tanques del cultivo de peces mediante tubos de pvc de 3/4".

Los tanques de peces, el filtro mecánico y el biofiltro estuvieron dentro de un invernadero recubierto con plástico con transmisión de luz aproximada de 81 por ciento, se colocaron puertas de entrada y salida enrollables en la parte posterior y frontal del módulo acuapónico para la regulación de la temperatura ambiental.

Las camas acuapónicas estuvieron expuestas a la temperatura ambiental cubiertas con malla raschel para evitar la luz directa del sol.



Figura 8: Camas acuapónicas del sistema experimental.

3.2.3. RECIRCULACIÓN DE AGUA

El sistema experimental funcionó mediante recirculación de agua constante durante las 24 horas del día en cada etapa del experimento. Para impulsar el agua se usó una bomba sumergible de 130 W, marca Hailea, colocadas en el fondo del tanque de reserva la cual llevaba el agua a los tanques de peces para luego bajar por gravedad a través de tubos de pvc de ¾” del filtro mecánico, el biofiltro y la cama acuapónica, retornando al tanque de reserva.

El sistema funcionó con un caudal de 2 L.min⁻¹.

3.3. CAMAS HIDROPÓNICAS DE CONTROL

Paralelo al cultivo de lechugas en el sistema acuapónico, se utilizaron camas hidropónicas de control para el crecimiento vegetal (Figura 9). En el cultivo hidropónico se utilizó una solución nutritiva comercial La Molina, en tanto se usó la técnica de cultivo de raíces flotantes igual al sistema acuapónico.



Figura 9. Camas hidropónicas de control.

Las camas hidropónicas de control consistieron en 3 tanques de cemento (1,33 m x 1,12 m x 0,23 m) con una capacidad de llenado de 0,2803 m³, el interior fue revestido con plástico

negro y en la superficie de cada una se colocó poliestireno expandido de una pulgada de espesor perforado cada 20 cm con una separación triangular.

Las camas hidropónicas de control no contaron con entradas y salidas de agua, ya que el volumen fue añadido al inicio del cultivo junto con la solución hidropónica La Molina en las cantidades recomendadas para cultivos hidropónicos (5 ml.L⁻¹ de la solución A y 2 ml.L⁻¹ de la solución B, ver anexo 1). Por ello, para mantener la oxigenación y circulación del agua en estos tanques se colocó una bomba sumergible de 25 W en cada una de las unidades.

3.4. PECES UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Se utilizaron peces de la especie tilapia (*O. niloticus*) que fueron adquiridos del Centro de Investigación Piscícola (CINPIS) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los peces que se usaron fueron 100 por ciento machos con un rango de peso descrito en la Tabla 13.

Tabla 13: Rango de peso inicial de peces usados en las diferentes etapas de la investigación

Etapas	Rango de pesos	Número de peces	Desviación estándar
Primera etapa	160-196 g	12	± 8.9
Segunda etapa	217-304 g	8	± 25.5
Tercera etapa	122-280 g	13	± 45.1

3.5. PLÁNTULAS (LECHUGAS)

Las plántulas de lechuga (*L. sativa*) fueron obtenidas del Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Se utilizaron para todo el experimento 360 plántulas, éstas tuvieron un tiempo de 30 días germinadas al momento de la siembra en el sistema acuapónico y camas hidropónicas de control. La variedad utilizada fue Duett la cual presenta hojas lisas, textura suave y son tolerantes a temperaturas que varían entre 20 a 28°C.

3.6. ALIMENTACIÓN

Los peces, en cada una de las tres etapas, fueron alimentados con una tasa de alimentación del tres por ciento de la biomasa total. La ración alimenticia se ajustó cada dos semanas de acuerdo con la biomasa. El alimento extruido fue adquirido a la empresa Aquatech contaba con 35 por ciento de proteína. El perfil nutricional del alimento utilizado se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Perfil Nutricional del alimento balanceado comercial (análisis proximal garantizado)

Alimento	Proteína mín. (Por ciento)	Grasa mín. (Por ciento)	Fibra máx. (Por ciento)	Humedad máx. (Por ciento)	Ceniza máx. (Por ciento)	Tamaño de pellet (mm)
Tilapia 35	35	4	5	10	10	3 x 3

Fuente: Aquatech (2017)

La frecuencia de alimentación fue tres veces por día en los horarios de 9 a.m., 12 p.m. y 3 p.m. según lo sugerido por Meyer (2004).

3.7. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

La investigación fue realizada en tres etapas. Las cuales se describen en detalle líneas abajo.

3.7.1. PRIMERA ETAPA

El propósito de la primera etapa del experimento fue identificar los nutrientes presentes en el efluente acuícola a determinada biomasa para obtener datos iniciales para las siguientes etapas, por ello no se añadió nutrientes inorgánicos al sistema; ya que el crecimiento de lechugas se dio a través del efluente acuícola proveniente de los filtros biológicos. Esta etapa tuvo una duración de 30 días.

Se inició con la siembra de tilapias, con una biomasa inicial de 5 kg.m^{-3} , con peso y longitud promedio inicial de $175,8 \pm 8,9 \text{ g}$ y $22,2 \pm 0,4 \text{ cm}$; respectivamente. Las plántulas de lechugas que fueron sembradas en las camas acuapónicas y en los controles, cada unidad tuvo un peso promedio inicial de $5,3 \pm 1,4 \text{ g}$ colocando en cada cama acuapónica y en la hidropónica control 20 lechugas.

Al concluir los 30 días, se evaluó el crecimiento de los peces y lechugas, asimismo se tomaron muestras de agua a la salida de cada cama acuapónica para el análisis de concentración de los macro y micronutrientes. Durante los 30 días de cultivo, en las lechugas, se realizó un diagnóstico visual y registro fotográfico entre el sistema acuapónico e hidropónico control para identificar los síntomas de deficiencias nutricionales como bajo crecimiento, coloración de hojas, formación de cogollo y otras características.

3.7.2. SEGUNDA ETAPA

El objetivo de la segunda etapa, cuya duración fue de 30 días, fue añadir los nutrientes deficitarios, identificados en la etapa anterior, para el mejoramiento del crecimiento vegetal; los cuales fueron adicionados los últimos 15 días de cultivo. El cálculo de adición de los nutrientes deficitarios es descrito más adelante.

Antes del inicio de la segunda etapa, el agua del sistema acuapónico fue cambiada totalmente. Al igual que en la primera etapa se inició con una biomasa de 5 kg.m^{-3} de peces con peso y longitud promedio inicial de $265,1 \pm 25,5 \text{ g}$ y $25 \pm 0,7 \text{ cm}$, respectivamente. Se utilizó la misma tasa y frecuencia de alimentación descrita previamente.

En esta etapa se adicionaron los nutrientes deficitarios identificados en el análisis de agua considerando una mínima adición de estos para evitar algún efecto en el crecimiento y sobrevivencia de los peces tal como se describe en el numeral 3.7.4.

El número de plántulas de lechugas sembradas por cada cama acuapónica e hidropónica control fueron 20, con pesos promedios de $4,6 \pm 1,53 \text{ g}$.

La biometría de los peces se realizó cada 15 días y la biometría de lechugas, al igual que el análisis de los macro y micronutrientes, se realizó al final de la etapa.

3.7.3. TERCERA ETAPA

La tercera etapa de la investigación fue similar a la anterior con la diferencia que la adición de los nutrientes deficitarios se realizó desde el día uno de la experimentación, pues en la

segunda etapa se observó que la producción de lechugas en las camas hidropónicas seguía siendo mayor que en las camas acuapónicas. Las cantidades de los nutrientes fueron adicionados diariamente en pequeñas concentraciones para evitar que afecte al crecimiento y sobrevivencia de los peces.

Al igual que en la primera y segunda etapa, se realizó el recambio total de agua del sistema acuapónico y la biomasa inicial de peces fue 5 kg.m^{-3} con peso y longitud promedio inicial de $162,2 \pm 45,1 \text{ g}$ y $21,7 \pm 1,7 \text{ cm}$; con la misma tasa de alimentación y frecuencia que en las etapas anteriores. El periodo de duración de la experimentación fue de 30 días.

La biometría de los peces se realizó cada 15 días y las lechugas fueron evaluadas al final de la tercera etapa. El número de plántulas de lechugas sembradas por cada cama acuapónica e hidropónica control fueron 20, con pesos promedios de $0,6 \pm 0,16 \text{ g}$.

Las lechugas, en esta etapa, fueron adquiridas con un peso y longitud menor a las anteriores etapas debido a que sólo tenían 15 días de germinación, se decidió utilizar dichas lechugas ya que se aproximaba el cambio de estación y por consiguiente el aumento de la temperatura ambiental.

3.7.4. ADICIÓN DE NUTRIENTES

Los nutrientes añadidos en la segunda y tercera etapa del presente trabajo fueron identificados al final de la primera etapa mediante el análisis de agua, a partir de estos resultados se realizaron las correcciones de las concentraciones de cada nutriente y sólo fue añadido en función al volumen de las camas acuapónicas. Las concentraciones de los nutrientes determinados para el sistema acuapónico se definieron según lo recomendado por el Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) para el cultivo de lechuga hidropónica, Tabla 15. Se usaron compuestos inorgánicos (Tabla 16) utilizados en la preparación de la solución nutritiva La Molina.

Tabla 15: Concentración de nutrientes (mg.L⁻¹) para cultivos hidropónicos La Molina

Nutriente	La Molina
N	190
S	70*
P	35
Ca	150*
K	210
Mg	45*
Fe	1
Mn	0,5
Cu	0,1
B	0,5*
Zn	0,15
Mo	0,05

Fuente: Rodríguez citado por Mendoza (2015)

*Incluye lo que aporta el agua.

Para determinar la cantidad de nutrientes que fue añadido diariamente al sistema, se dividió la concentración total de cada nutriente entre el tiempo de duración de cada etapa (2 y 3), esta cantidad fue distribuida dos veces al día.

Los nutrientes fueron diluidos en recipientes con agua del mismo sistema y adicionados en los tanques de reserva para que los nutrientes añadidos circulen por toda la unidad experimental.

Tabla 16: Compuestos inorgánicos utilizados en el Sistema acuapónico

Compuestos inorgánicos	Fórmula	Porcentaje del elemento suplementario
Hidróxido de Potasio	KOH	69,53% K
Quelato de Hierro EDDHA	C ₁₈ H ₁₆ N ₂ O ₆ FeNa	6% Fe
Sulfato de Manganeso	MnSO ₄ .H ₂ O	31% Mn
Sulfato de Cobre	CuSO ₄ .5H ₂ O	25% Cu
Sulfato de Zinc	ZnSO ₄ .7H ₂ O	22% Zinc
Molibdato de amonio	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	54% Mo

El cálculo para determinar la cantidad de nutriente que fue adicionada al sistema fue el siguiente:

$$X = \frac{A}{B} * C$$

Donde:

- X: Concentración del nutriente deficitario (para cualquiera de los nutrientes)
- A: Concentración del nutriente limitante en la solución nutritiva en mg.L⁻¹
- B: Porcentaje del nutriente limitante en el compuesto inorgánico
- C: Volumen de la cama hidropónica en m³

3.7.5. CALIDAD DE AGUA

El agua utilizada en la investigación fue agua potable adquirida de proveedores del servicio de agua potabilizada de Lima con cisternas para el transporte, cada vez que se compró agua se realizó la cloración de la misma con lejía comercial de 5,5 por ciento de concentración. Para la eliminación del cloro residual se oxigenó el agua por 5 días aproximadamente, para luego analizar los parámetros iniciales de ésta en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Agraria La Molina. La adquisición del agua se realizó antes de la primera y tercera etapa siendo colocadas en reservorios ubicados en el Centro de investigación Piscícola (CINPIS).

Los parámetros físicos y químicos del agua fueron medidos diariamente y semanalmente antes de proporcionar alimento a los peces tal como se describe en la Tabla 17. El monitoreo realizado permitió controlar los parámetros adecuados para el sistema acuapónico.

Tabla 17: Equipos y frecuencia de medición de parámetros de calidad de agua

Parámetros	Unidades	Equipo y/o Método	Frecuencia
Temperatura (°T)	°C	Oxímetro YSI 550A	Diaria (9 a.m., 12 m. y 3p.m.)
Oxígeno Disuelto (OD)	mg.L ⁻¹ y porcentaje de saturación	Oxímetro YSI 550A	Diaria (9 a.m., 12 m. y 3p.m.)
Potencial de hidrógeno (pH)		Potenciómetro Oakton 510 Series	Diaria (9 a.m., 12 m. y 3p.m.)
Conductividad eléctrica (k)	µS.cm ⁻¹	Multiparámetro HACH HQ40d	Diaria (9 a.m., 12 m. y 3p.m.)
Alcalinidad	mg CaCO ₃ .L ⁻¹	Volumétrico	Interdiario (12 m.)
Nitrógeno Amoniacal (NAT)	mg.L ⁻¹	Espectrofotómetro HACH – DR/3900- HACH 8155	Dos veces por semana (12 m.)
Nitritos	mg.L ⁻¹	Espectrofotómetro HACH – DR/3900- HACH 8507	Dos veces por semana (12 m.)
Nitratos	mg.L ⁻¹	Espectrofotómetro HACH – DR/3900 - HACH 8039	Dos veces por semana (12 m.)

En el sistema acuapónico se tomaron muestras de agua en cada etapa y repetición, éstas muestras fueron tomadas en tres lugares del sistema: el primero a la salida de los tanques de peces (TP); el segundo, a la salida del biofiltro (SB) y el último a la salida de la cama acuapónica (SCA).

Además, al inicio y final de cada etapa se realizaron análisis de cationes y aniones, así como caracterización de los micronutrientes disponibles en el sistema (Tabla 18), estas muestras fueron tomadas sólo a la salida de las camas acuapónicas. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Agraria La Molina.

Tabla 18: Cationes, aniones y micronutrientes analizados en cada etapa

	Nutrientes	Símbolo	Unidades
Cationes	Calcio	Ca	mg.L ⁻¹
	Magnesio	Mg	mg.L ⁻¹
	Potasio	K	mg.L ⁻¹
	Sodio	Na	mg.L ⁻¹
Aniones	Nitratos	NO ₃ ⁻¹	mg.L ⁻¹
	Carbonatos	CO ₃ ⁻²	mg.L ⁻¹
	Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻¹	mg.L ⁻¹
	Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg.L ⁻¹
	Cloruros	Cl ⁻¹	mg.L ⁻¹
Micronutrientes	Boro	B	mg.L ⁻¹
	Cobre	Cu	mg.L ⁻¹
	Hierro	Fe	mg.L ⁻¹
	Manganeso	Mn	mg.L ⁻¹
	Zinc	Zn*	mg.L ⁻¹

*En la segunda y tercera etapa.

3.8. EVALUACIÓN DE PECES Y PLANTAS

3.8.1. PECES

Durante cada etapa, en el periodo de 30 días, se realizó la biometría de los peces cada dos semanas. Por cada etapa se realizaron tres biometrías: inicial, intermedia y final. Los peces fueron pesados individualmente en una balanza de precisión Ohaus *Scout Pro* SP 2001 (capacidad 2000 g ± 0,1 g) para registrar los valores de peso. Para obtener la longitud total de los peces se usó un ictiómetro de 60 cm, la medida se realizó desde el extremo de la mandíbula hasta el final de la aleta caudal. Las biometrías se realizaron a cada individuo de la experimentación.

Para determinar la producción de los peces, fueron estimados los siguientes parámetros:

a. INCREMENTO DE BIOMASA (IC)

Se estimó el incremento de biomasa al finalizar cada etapa, la cual fue calculada en kilogramos por metro cúbico, con la siguiente fórmula:

$$\text{IC} = \text{Biomasa final (kg)} - \text{biomasa inicial (kg)}$$

b. TASA DE CRECIMIENTO ESPECÍFICA (SGR%. día⁻¹)

Para cada tratamiento y cada repetición se relacionaron las variables peso (g.petz⁻¹) y tiempo (número de días de cada tratamiento). Este parámetro estima la tasa de crecimiento diaria o ganancia media de peso por día.

$$SGR = \frac{100 \times (\ln \text{ peso final} - \ln \text{ peso inicial})}{\text{tiempo}}$$

Donde:

Ln : Logaritmo natural

c. SOBREVIVENCIA

Se estimó el porcentaje de sobrevivencia al final de cada etapa, esta fue calculada en porcentaje.

$$\% \text{Sobrevivencia} = \frac{N_t}{N_o} \times 100\%$$

Nt: Población final

No: Población inicial

d. FACTOR DE CONDICIÓN (K)

Este factor es considerado como índice de robustez para peces, el valor varía de acuerdo con la especie considerando un crecimiento homogéneo (Weatherley y Gill, 1987 y Steffens citados por Arnulfo, 2015).

$$K = \frac{P}{L^3} \times 100$$

Donde:

P : Peso promedio (g)

L : Longitud total del pez (cm)

e. CANTIDAD DE ALIMENTO CONSUMIDO

Se determinó la cantidad de alimento utilizado en el cultivo de tilapia en el sistema acuapónico. Fitzsimmons citado por Licamele *et al.* 2009 indica que aproximadamente se necesita un kilogramo de alimento de peces para cosechar 20 cabezas de lechuga.

$$CA=(B \times TA \times d) - ANC$$

Donde:

B : Biomasa (g)

TA : Tasa de alimentación (%)

d : Número de días

ANC: Alimento no consumido (g)

f. FACTOR DE CONVERSIÓN ALIMENTICIA

Se determinó con el peso total del alimento entregado durante cada etapa y el peso total ganado, hallado con la diferencia entre la biomasa final e inicial.

$$FCR = \frac{\text{Peso total de alimento seco entregado (g)}}{\text{Peso total ganado (g)}}$$

3.8.2. LECHUGAS

Al final de cada etapa se evaluaron las siguientes medidas, consideradas indicadores de crecimiento en cultivos vegetales, según lo planteado por Guerrero *et al.* (2014):

a. PESO FRESCO TOTAL

Al realizar la cosecha se pesó cada planta de lechuga en su totalidad (cabeza y raíz), se empleó una balanza de precisión Ohaus *Scout Pro* SP 2001 (capacidad 2000 g ± 0,1g).

b. ALTURA DE LA PLANTA

Al finalizar el periodo de cada tratamiento (30 días por tratamiento) se procedió a medir la altura de cada planta individualmente desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja (Cajo 2016), para ello se utilizó una cinta métrica.

c. LONGITUD DE RAÍZ

Se tomaron medidas de la raíz más larga de la planta.

d. NÚMERO DE HOJAS

Se realizó el conteo del número de hojas por cabeza de lechuga en cada etapa.

e. RENDIMIENTO

El rendimiento se obtuvo sumando el peso fresco total de las lechugas cosechadas en cada etapa, expresando los valores en kilogramos por m² (Álvarez y Lasso, mencionado por Guerrero *et al.* 2014).

3.9. DISEÑO EXPERIMENTAL

La evaluación de los datos obtenidos fue aplicada con un diseño completamente al azar (DCA), evaluando las tres etapas con tres repeticiones, cada etapa fue considerada un tratamiento. Los tratamientos aplicados fueron los siguientes:

- T1: Producción acuapónica de tilapia y lechuga sin adición de nutrientes.
- T2: Producción acuapónica de tilapia y lechuga con adición de nutrientes a partir de la tercera semana.
- T3: Producción acuapónica de tilapia y lechuga con adición de nutrientes desde el inicio del experimento.

Por lo mencionado anteriormente se planteó las siguientes hipótesis por componente vegetal e hidrobiológico:

H_{0a} = No existen diferencias significativas en la producción de tilapia en un sistema acuapónico entre el tratamiento de la etapa 1 y los tratamientos de las etapas 2 y 3.

H_{1a} = Existen diferencias en la producción de tilapia en un sistema acuapónico entre el tratamiento de la etapa 1 y al menos uno de los tratamientos de las etapas 2 y 3.

H_{0b} = No existen diferencias significativas en la producción de lechugas en un sistema acuapónico entre el tratamiento de la etapa 1 y los tratamientos de las etapas 2 y 3.

H_{1b} = Existen diferencias en la producción de lechugas en un sistema acuapónico entre el tratamiento de la etapa 1 y al menos uno de los tratamientos de las etapas 2 y 3.

Los datos de biomasa final de los componentes hidrobiológico y vegetal fueron analizados mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si existe diferencias significativas (nivel de significancia=0,05) en la biomasa final obtenida (peces y lechugas) en las tres etapas de la investigación. Posteriormente se aplicó la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las tres etapas mediante el programa *SPSS Statistics Data*.

En el caso de los datos de calidad de agua de las tres etapas, al no cumplir los supuestos de homogeneidad de varianza y normalidad fueron comparados mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis con el software *SPSS Statistics Data*.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DETERMINACIÓN DE MACRO Y MICRONUTRIENTES EN EL SISTEMA ACUAPONICO

Los nutrientes presentes en el agua del sistema acuapónico fueron analizados al finalizar los 30 días de cultivo en cada etapa. En la Tabla 19 se muestran las concentraciones iniciales y finales promedio de los nutrientes presentes en el sistema acuapónico.

Tabla 19: Concentración promedio de los nutrientes en cada etapa de la investigación

Nutrientes	Etapa 1 (E1)		Etapa 2 (E2)	Etapa 3 (E3)	
	Inicio	Final ^a	Final ^a	Inicial	Final ^a
Nitratos, NO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	9,92	26,66 ± 1,1	17,98 ± 1,2	0,62	31,83 ± 3,5
Fosfatos, PO ₄ ⁻ (mg.L ⁻¹)	1,08	4,75 ± 0,6	3,05 ± 1,6	1,6	3,05 ± 1,2
Bicarbonatos, HCO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	136,34	95,16 ± 15,6	127,69 ± 2,5	117,73	123,42 ± 13,8
Sulfatos, SO ₄ ⁻ (mg.L ⁻¹)	169,92	257,6 ± 9,4	385,60 ± 3,1	149,28	528 ± 32,03
Cloruros, Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	224	141,17 ± 17,6	200,08 ± 15,1	42	68,63 ± 4,1
Calcio, Ca ²⁺ (mg.L ⁻¹)	141	131,33 ± 2,3	162,33 ± 2,5	70,8	95 ± 4,58
Magnesio, Mg ²⁺ (mg.L ⁻¹)	21	20,92 ± 2,1	28,68 ± 0,6	8,76	13,57 ± 0,55
Potasio, K ⁺ (mg.L ⁻¹)	6,24	15,08 ± 0,2	43,55 ± 2,1	2,73	74 ± 2,65
Sodio, Na ⁺ (mg.L ⁻¹)	80,04	60,697 ± 6,6	99,97 ± 6,6	46	30,97 ± 3,51
Boro, B (mg.L ⁻¹)	0,24	0,9033 ± 0,2	0,367 ± 0,07	0,18	0,413 ± 0,09
Cobre, Cu (mg.L ⁻¹)	0,01	0,0017 ± 0,001	0,08 ± 0,01	0,002	0,03 ± 0
Hierro, Fe (mg.L ⁻¹)	0,05	0,0333 ± 0,04	0,0643 ± 0,03	0,118	0,21 ± 0,01
Manganeso, Mn (mg.L ⁻¹)	n.a	0,0053 ± 0,001	0,1907 ± 0,03	0,003	0,03 ± 0,02
Zinc, Zn (mg.L ⁻¹)	n.a	n.a	0,0047 ± 0,001	0,027	0,02 ± 0

n.a: No analizado

^a Valores promedio n=3

Los nutrientes para el crecimiento vegetal se dividen en macronutrientes como nitrógeno, potasio, fósforo, azufre, calcio y magnesio; y micronutrientes como el hierro, boro, manganeso, cobre, zinc y cloro. Adicional a ellos es importante considerar al bicarbonato y sodio como nutrientes útiles porque cumplen la función de mantener un ambiente adecuado para el desarrollo de vegetal. En relación a la absorción de ellos, Lara (1999) indica que son disponibles en su forma iónica disueltos en el agua.

En la Tabla 19, se observa la concentración promedio de los macronutrientes, micronutrientes, sodio y bicarbonato presente en el agua inicial y final en cada etapa de la experimentación. En la etapa 1 (E1) y 2 (E2) el agua inicial fue de la misma fuente, es decir, la adquisición se realizó en la misma fecha; en cambio, en la etapa 3 (E3), el agua fue provisionada en fechas posteriores; por ello las características iniciales difieren de las anteriores. Tal como se observa, la concentración de nutrientes inicial del agua en la E1 fue mayor que en la E3 en todos los nutrientes, sodio y bicarbonatos, excepto en fosfatos (1,08 y 1,6 mg.L⁻¹, respectivamente) y hierro (0,05 y 0,118 mg.L⁻¹, respectivamente).

Con respecto a la variación de la concentración inicial de los nutrientes versus el valor final se puede apreciar que los valores iniciales, en la etapa 1, disminuyen al término de la experimentación en la mayoría de nutrientes; a diferencia de las etapas 2 y 3, donde las concentraciones aumentan, excepto en bicarbonatos y cloruros de la E2 y sodio y zinc de la E3.

En la etapa 1, el crecimiento vegetal se realizó sin la adición de nutrientes. En esta etapa se observa que las concentraciones promedio finales de los macronutrientes nitrógeno ($26,66 \pm 1,1 \text{ mg.L}^{-1}$), fósforo ($4,75 \pm 0,6 \text{ mg.L}^{-1}$), azufre ($257,6 \pm 9,4 \text{ mg.L}^{-1}$) y potasio ($15,08 \pm 0,2 \text{ mg.L}^{-1}$) aumentaron considerablemente con respecto a los valores iniciales (9,92; 1,08; 169,92 y 6,24 mg.L⁻¹, respectivamente). Lo mismo ocurre con el micronutriente boro siendo la concentración inicial 0,24 mg.L⁻¹, este valor presentó un gran aumento al final de la experimentación ($0,9033 \pm 0,2 \text{ mg.L}^{-1}$). En el caso del macronutriente magnesio tuvo una ligera disminución de la concentración inicial de 21 mg.L⁻¹ a $20,92 \pm 2,1 \text{ mg.L}^{-1}$.

En el caso de las etapas 2 y 3 luego de haber identificado los nutrientes excedentes y los limitantes en la primera etapa, se suplementó nutrientes desde el inicio de la semana 3 y desde el inicio de la experimentación, respectivamente; esto generó que los nutrientes aumentaran considerablemente en casi todos los macronutrientes y micronutrientes analizados, excepto en los valores de cloro de la etapa 2, los cuales tuvieron un comportamiento diferente al resto de nutrientes. Este micronutriente disminuyó ligeramente a $200,08 \pm 15,1 \text{ mg.L}^{-1}$ de 224 mg.L^{-1} que registró inicialmente.

Respecto a los valores de bicarbonatos, en la etapa 1, disminuyeron de 136,34 mg.L⁻¹ a 95,16 ± 15,6 mg.L⁻¹; en la etapa 2 presentó el mismo comportamiento pero en menor proporción disminuyendo de 136,34 mg.L⁻¹ a 127,69 ± 2,5 mg.L⁻¹. Sin embargo, en la etapa 3, la concentración final (123,42 ± 13,8 mg.L⁻¹) aumentó ligeramente con respecto al valor inicial (117,73 mg.L⁻¹).

En la etapa 1 las concentraciones de sodio disminuyeron ligeramente (60,697 ± 6,6 mg.L⁻¹) comparado con el valor inicial (80,04 mg.L⁻¹); al igual que en la etapa 3, la concentración final (30,97 ± 3,51 mg.L⁻¹) fue ligeramente menor al valor inicial (46 mg.L⁻¹). A diferencia de la etapa 2, donde la concentración final de este nutriente aumentó ligeramente de 80,04 a 99,97 ± 6,6 mg.L⁻¹.

En la Tabla 20 se presenta la variación de los resultados obtenidos en la etapa 1 donde se compararon la concentración óptima de nutrientes y el contenido de estos en la solución hidropónica comercial La Molina utilizada en la experimentación.

Tabla 20: Concentración óptima de los nutrientes para cultivo de hojas verdes, concentración de la solución hidropónica La Molina, concentración promedio de nutrientes del sistema acuapónico y forma de absorción

Nutrientes	Concentración óptima (ppm o mg.L ⁻¹) ^a	La Molina (mg.L ⁻¹)	Concentración promedio en la Etapa 1 (mg.L ⁻¹) ^c	Forma de absorción ^a
N	150-200	190	26,66 ± 1,1	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺
S	50-100	70 ^b	257,6 ± 9,4	SO ₄ ⁻
P	20-40	35	4,75 ± 0,6	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ⁻
Ca	150-200	150 ^b	131,33 ± 2,3	Ca ²⁺
K	200-250	210	15,08 ± 0,2	K ⁺
Mg	30-50	45 ^b	20,92 ± 2,1	Mg ²⁺
Fe	0,5-2	1	0,0333 ± 0,04	Fe ²⁺ , Fe ³⁺
Mn	0,3-0,5	0,5	0,0053 ± 0,001	Mn ²⁺
Cu	0,1-0,2	0,1	0,0017 ± 0,001	Cu ²⁺
B	0,3-0,5	0,5 ^b	0,9033 ± 0,2	B(OH) ₃
Zn	0,1-0,3	0,15	n.a	Zn ²⁺ , Zn(OH) ₂
Mo	0,01-0,05	0,05	n.a	MoO ₄ ⁺

^a Datos extraídos de Rodríguez citado por Mendoza (2015). ^b Valores que incluyen lo que aporta el agua.

^c Valores promedio n=3

n.a: No analizado

El desarrollo de la etapa 1 permitió identificar los nutrientes deficitarios para el crecimiento vegetal, el cual se observa en la Tabla 20, así los nutrientes nitrógeno, fósforo, potasio, hierro, manganeso y cobre presentaron una considerable menor concentración que la sugerida para soluciones hidropónicas para desarrollo vegetal de hojas verdes y la solución nutritiva comercial La Molina. En el caso de calcio y magnesio, la concentración obtenida fue ligeramente cercana a los rangos sugeridos; contrario a lo registrado en boro y azufre ya que estos presentaron concentraciones finales mayores que la concentración óptima sugerida por Rodríguez citado por Mendoza (2015) y la solución hidropónica La Molina. Por último, se debe indicar que la concentración de molibdeno a pesar de que no fue analizado se asumió como deficiente en el sistema acuapónico debido a que según lo reportado por El-Sayed (2006) los micronutrientes necesarios en la dieta de tilapia son Zn, Fe y Mn; por lo tanto Mo no está considerado dentro de las premezclas comerciales utilizadas en la formulación de alimento balanceado para peces (Salinas, 2017).

Asimismo, se consideró las características visuales presentadas en las lechugas cultivadas en el sistema acuapónico comparadas con las lechugas del cultivo hidropónico de control durante la etapa 1, tal como se observa en la Figura 10.

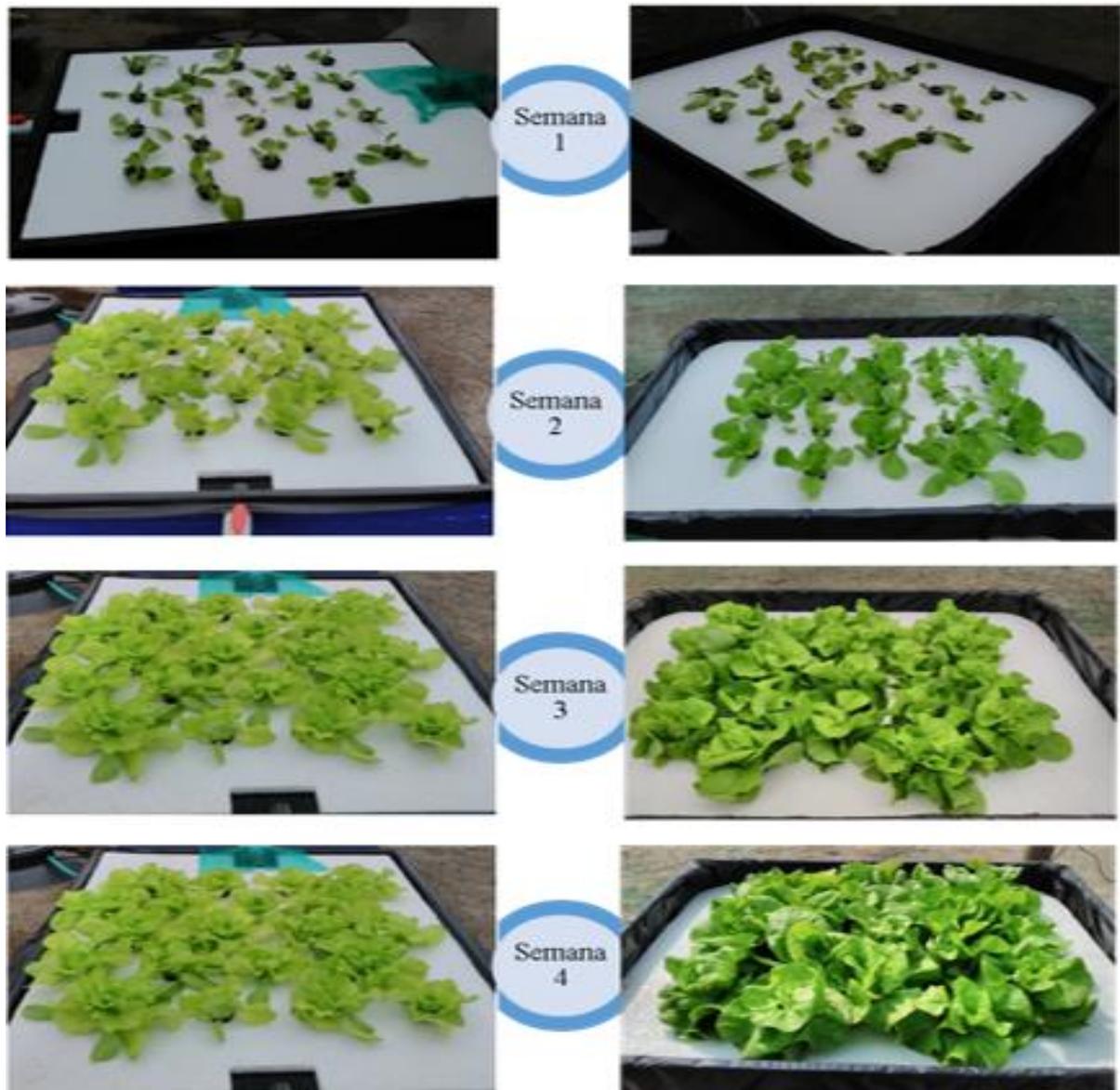


Figura 10: Comparación visual del crecimiento de lechugas en el Sistema acuapónico (Izquierda) y el control-cultivo hidropónico (derecha) en la etapa 1

La Figura 10 muestra las deficiencias visibles en el crecimiento de las lechugas cultivadas en el sistema acuapónico como clorosis en las hojas (color amarillento) y menor crecimiento que las lechugas hidropónicas; estas características se presentan por deficiencia de algunos nutrientes. Es así que Marulanda (2003) indica que la deficiencia de hierro genera un color pálido amarillento en las hojas y raíces muy ramificadas aunque existan cantidades óptimas de nitrógeno; otros nutrientes causantes de clorosis son el manganeso (Mollehuanca 2019), azufre (Sierra *et al.*, 2007; Gordillo, 2017) y nitrógeno, además este último produce una reducción en el crecimiento (Marulanda, 2003). Asimismo, la deficiencia de potasio genera

crecimiento retardado y necrosamiento en el borde de las hojas (Maroto citado por La Rosa, 2015). Estas características observadas en la experimentación de deficiencia de nutrientes concuerdan con las bajas concentraciones finales de los macro y micronutrientes obtenidas en la etapa 1.

La información de la Tabla 20 permitió corregir los valores de los nutrientes deficitarios para mejorar el crecimiento de las lechugas en el sistema acuapónico. Por tal motivo, en la segunda etapa se agregaron nutrientes como potasio, hierro, manganeso, cobre, zinc y molibdeno a los 15 días de la experimentación, ya que como se observa en la Figura 11, fue más visible la clorosis y menor crecimiento en las lechugas a partir de dicho tiempo. A diferencia de la etapa 3, donde se añadió los nutrientes desde el inicio, el cual será discutido posteriormente.

Los valores de nitrógeno, fósforo y magnesio no fueron considerados en la corrección de nutrientes ya que en el cultivo acuapónico el ingreso de estos es diario mediante el alimento de los peces y los productos generados de la excreción de los mismos o por la descomposición bacteriana de estos productos (Rakocy *et al.*, 2006).

En la Tabla 21 se representa la cantidad promedio del compuesto inorgánico adicionado al sistema acuapónico y la concentración de nutrientes contenido en éste durante los últimos 15 días de cultivo. En la etapa 2, para hierro y potasio, la concentración fue en promedio el 50 por ciento de lo sugerido para el cultivo de lechugas hidropónicas con solución nutritiva comercial La Molina. En cambio, para los nutrientes manganeso, cobre, zinc y molibdeno fue aproximadamente 25 por ciento, ya que fueron adicionados a partir del inicio de la cuarta semana de cultivo.

En la etapa 3, la concentración total adicionada en los 30 días de cultivo fue similar a la solución hidropónica La Molina. En ambos casos se consideró sólo el volumen de las camas acuapónicas para obtener la cantidad de los nutrientes deficientes que fueron añadidos al sistema.

Tabla 21: Concentración de nutrientes adicionados al sistema acuapónico

Nutrientes deficientes adicionados al cultivo acuapónico	Potasio	Hierro	Manganeso	Cobre	Zinc	Molibdato
Compuesto adicionado	Hidróxido de potasio	Quelato de hierro EDDHA	Sulfato de manganeso	Sulfato de cobre	Sulfato de zinc	Molibdato de amonio
Volumen promedio (m³) de cama acuapónica			0,40275			
Solución nutritiva La Molina (mg.L⁻¹)	210	1	0,5	0,1	0,15	0,05
Cantidad promedio de compuesto total	72,08	3,74	0,176	0,04	0,072	0,008
Etapa 2						
adicionado (g)						
Concentración total (mg.L⁻¹)	113,23	0,55	0,14	0,02	0,04	0,01
Cantidad promedio de compuesto total	127,2	6,6	0,66	0,15	0,27	0,03
Etapa 3						
adicionado (g)						
Concentración total (mg.L⁻¹)	199,83	0,98	0,51	0,09	0,15	0,04

4.1.1. EVALUACIÓN DE LOS NUTRIENTES EN LAS ETAPAS DE LA EXPERIMENTACIÓN

a. Macronutrientes

La variación de la concentración promedio final en miligramos por litro de los macronutrientes calcio, magnesio, potasio, azufre y nitrógeno del sistema acuapónico en cada una de las etapas (1, 2 y 3) del presente estudio se observa en la Figura 11, además se incluye la comparación de las concentraciones promedio de los mencionados nutrientes con el cultivo hidropónico de control en las etapas 2 y 3.

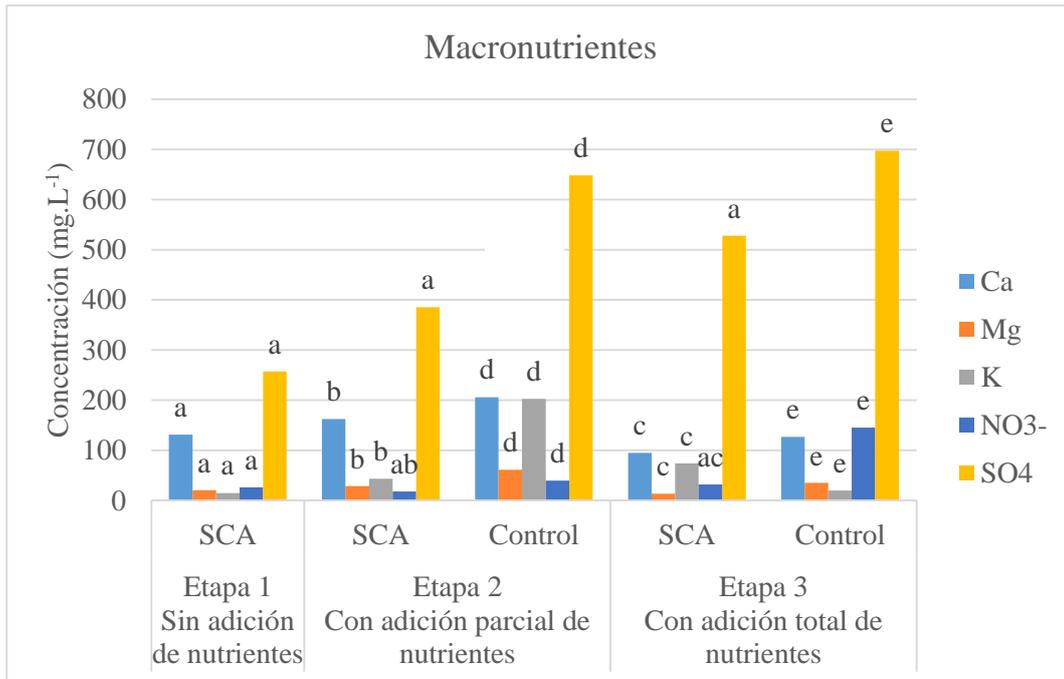


Figura 11: Variación de las concentraciones finales de macronutrientes promedio del sistema acuapónico (SCA) y el cultivo hidropónico (control) en cada una de las etapas experimentales (Letras diferentes en barras del mismo color muestran diferencias significativas $p < 0,05$).

Con respecto a los macronutrientes presentes en el agua del sistema acuapónico (Figura 11), según el análisis estadístico, existieron diferencias significativas para potasio, calcio y magnesio entre las etapas 1 y 2 de la experimentación ($p < 0,05$). En el caso del potasio, este fue adicionado en la etapa 2 (desde los últimos 15 días de cultivo) debido a que la concentración obtenida en la etapa 1 fue menor a lo recomendada para el cultivo de lechuga (Tabla 20); sin embargo, a pesar de que la concentración durante el desarrollo del cultivo acuapónico con la adición de KOH en la etapa 2 ($43,55 \pm 2,1 \text{ mg.L}^{-1}$) no fue 100 por ciento similar a lo requerido, se observó un crecimiento vegetal pues este nutriente está ligado con el factor crecimiento (Black citado por Martínez y Garcés, 2010). En la Figura 12, se muestra, un ligero cambio en la tercera semana de la etapa 2 y un mayor crecimiento al terminar la cuarta semana respecto al tamaño y altura de hoja como se discutirá más adelante. Además, la adición total de potasio fue $113,23 \text{ mg.L}^{-1}$ (Tabla 21) y finalmente se obtuvo un valor residual de $43,55 \pm 2,1 \text{ mg.L}^{-1}$ notándose un consumo de potasio por las lechugas.



Figura 12: Comparación visual del crecimiento de lechuga en el sistema acuapónico durante la etapa 1, sin adición de nutrientes; 2, con adición de nutrientes a partir de los últimos 15 días de cultivo y 3, con adición de nutrientes desde el inicio del cultivo.*Se indican los nutrientes adicionados en el sistema.

Las concentraciones promedio de potasio en las etapas 1, 2 y 3 presentaron diferencias significativas, incrementando las concentraciones finales, respectivamente. El mayor incremento se presentó en la etapa 3 ($74 \pm 2,65 \text{ mg.L}^{-1}$), debido a que la adición de KOH se realizó desde el inicio de esta etapa y aunque no se obtuvo un buen crecimiento vegetal, el potasio fue utilizado por las lechugas ya que se adicionó una concentración total de $199,83 \text{ mg.L}^{-1}$, la que fue añadida diariamente.

Por otro lado, la concentración final de potasio, en la etapa 2, fue similar a lo reportado por Al-Hafedh *et al.* citados por Delaide, 2017 (48 mg.L^{-1}) pero menor a lo obtenido por Pantanella *et al.* citados por Delaide, 2017 (106 mg.L^{-1}) en sistemas acuapónicos de cultivo de lechuga y tilapia.

El calcio (Ca), como se mencionó en párrafos anteriores, no fue adicionado al sistema acuapónico en la etapa 2 debido a que la concentración final en la etapa anterior fue similar a la sugerida para cultivos de hoja y en la solución nutritiva La Molina (Tabla 20), además como citan Torres-Novoa y Hurtado-Nery (2012), este nutriente está presente en la dieta para tilapias, siendo diario el aporte de calcio mediante el ingreso del alimento y en el agua inicial del cultivo. Asimismo, se observa que la concentración promedio final de calcio en la etapa 2 ($162,33 \pm 2,5 \text{ mg.L}^{-1}$) fue ligeramente mayor a la etapa 1 ($131,33 \pm 2,3 \text{ mg.L}^{-1}$), el cual podría estar relacionado con la reposición del agua perdida por evaporación.

A diferencia de las etapas previas (1 y 2), la concentración promedio de calcio ($95 \pm 4,58 \text{ mg.L}^{-1}$) en la etapa 3 fue considerablemente menor, lo cual se relaciona con la concentración inicial de Ca en el agua ($70,8 \text{ mg.L}^{-1}$), ya que en las etapas 1 y 2 el contenido inicial (141 mg.L^{-1}) fue relativamente mayor que en la etapa 3. Además, Cantor (2007) sugiere que las concentraciones de calcio en el cultivo de tilapia debe estar en un rango de $5-160 \text{ mg.L}^{-1}$, el cual coincide con los valores promedios obtenidos en cada una de las etapas. Sin embargo, Rakocy (2004) recomienda suplementar al sistema acuapónico con calcio para sistemas de cultivos acuapónicos continuos.

Al igual que el calcio, el nutriente magnesio no fue suplementado en la etapa 2 debido a que la concentración final en la etapa 1 fue ligeramente similar a la concentración óptima sugerida para lechugas. A pesar de ello, la concentración final de este nutriente en la etapa 2 ($28,68 \pm 0,6 \text{ mg.L}^{-1}$) fue ligeramente mayor que la etapa 1 ($20,92 \pm 2,1 \text{ mg.L}^{-1}$). El incremento entre las diferentes etapas podría corresponder a la reposición del agua evaporada, pues es un elemento presente en el agua relacionado con la dureza, similar al calcio. En la etapa 3, la concentración final fue mucho menor ($13,57 \pm 0,55 \text{ mg.L}^{-1}$) que en las etapas previas, debido que la concentración inicial de magnesio ($8,76 \text{ mg.L}^{-1}$) fue menor en esta etapa a diferencia de las etapas 1 y 2 (21 mg.L^{-1}).

Las concentraciones finales de magnesio obtenidas en cada etapa del presente trabajo estuvieron debajo de lo reportado por Pineda-Pineda *et al.* (2018) y Pantanella *et al.* citados por Delaide (2017) en cultivos acuapónicos de tilapia y lechuga; sin embargo, esta concentración obtenida por la primera (38 mg.L^{-1}) fue mayor debido a que utilizó una densidad inicial de 10 kg.m^{-3} de peces diferente a los 5 kg.m^{-3} de este estudio.

En relación a las concentraciones finales de sulfato (Figura 12), no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en las tres etapas de la experimentación, a pesar que en la etapa 2 y 3 fueron mayores ($385,6 \pm 3,1$ y $528 \pm 32,03 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente) que en la etapa 1 ($257,6 \pm 9,4 \text{ mg.L}^{-1}$).

El aumento de sulfato, en las dos últimas etapas, se debió a que los nutrientes manganeso, cobre y zinc fueron adicionados como compuestos inorgánicos que contenían sulfatos. Estos resultados sugieren que en cultivos continuos de vegetales este nutriente puede incrementarse con riesgo de producir efectos negativos en las plantas, pues Carrasco e Izquierdo (1996) indican que nutrientes como el sulfato en grandes cantidades inhibe la absorción de agua por las plantas, por tal motivo se debería buscar compuestos alternativos para la adición de los micronutrientes cobre y zinc.

El contenido de nitrógeno al final de cada etapa de la experimentación presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la etapa 2 ($17,98 \pm 1,2 \text{ mg.L}^{-1}$) y 3 ($31,83 \pm 3,5 \text{ mg.L}^{-1}$) debido a que en la última etapa los peces consumieron más alimento ($1,9 \pm 0,07$

kg) que en la etapa 2 ($1,1 \pm 0,11$ kg), el cual será explicado más adelante. A pesar que el contenido de nitrógeno en la segunda etapa fue menor, no se observó (Figura 12) deficiencia de este nutriente pues la biomasa de lechuga fue mayor en esta etapa.

La concentración final del sistema hidropónico de control, como se mencionó en el capítulo anterior numeral 3.3. referidos al cultivo hidropónico de lechuga con solución nutritiva comercial La Molina; fue comparada con las concentraciones finales del sistema acuapónico en las etapas 2 y 3 (Figura 11). En ella se observa que existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las concentraciones de los nutrientes de cada etapa con su respectivo control; siendo mayores las concentraciones de la solución nutritiva La Molina.

b. Micronutrientes

En la Figura 13 se observa que el cobre presentó diferencias significativas entre las etapas de la experimentación ($p < 0,05$); siendo mayor la concentración en la etapa 2 ($0,08 \pm 0,01$ mg.L⁻¹), a pesar que en la etapa 3 ($0,03 \pm 0$) la adición de este nutriente fue desde el inicio de la experimentación a diferencia de la etapa 2, en el cual fue añadido los últimos 15 días de cultivo. Esto podría explicarse debido a que la concentración inicial de cobre en la etapa 3 ($0,002$ mg.L⁻¹) fue significativamente menor que en la etapa 2 ($0,01$ mg.L⁻¹).

Durante la etapa 1, la concentración disminuye de $0,01$ (inicio) a $0,0017 \pm 0,001$ mg.L⁻¹ (final) durante los 30 días de la experimentación, pues como señala Rakocy (2002) el cobre no es acumulativo con respecto al ingreso del alimento por ello la adición de este nutriente se refleja en la concentración final de las etapas 2 y 3.

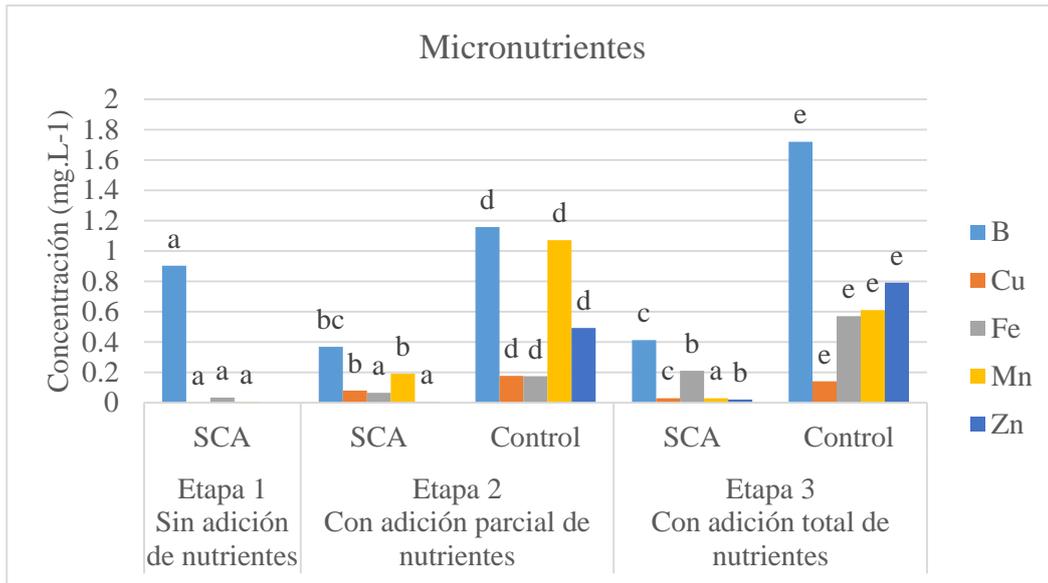


Figura 13: Variación de las concentraciones finales de macronutrientes promedio del sistema acuapónico y el cultivo hidropónico control en cada una de las etapas experimentales (Letras diferentes en barras del mismo color muestran diferencias significativas $p < 0,05$).

El hierro presentó diferencias significativas en la segunda y tercera etapa, debido a que en la etapa 2 se adicionó este nutriente a los 15 días del cultivo a diferencia de la tercera etapa, donde el hierro fue añadido desde el primer día de cultivo. Al igual que el cobre Rakocy (2002) señala que el hierro no es acumulativo respecto al alimento que ingresa al sistema acuapónico por lo que es necesaria su adición para cultivos de lechugas, esta afirmación se observa en la cantidad de hierro que se obtuvo al final de la etapa 1. La cantidad de hierro en esta etapa fue deficiente respecto al requerimiento de la lechuga el cual se vio reflejada en el color de las hojas, tornándose amarillentas, a diferencia de las lechugas de la etapa 2 y 3, que después de la adición cambiaron de color (Figura 13).

La concentración de boro sólo presentó diferencias significativas en la primera y segunda etapa ($p < 0,05$). En el caso de las etapas 2 y 3 comparadas con su respectivo control, se observa que las concentraciones finales fueron mayores en este último que en el sistema acuapónico, además los valores en el sistema control superan el valor recomendado para boro en soluciones nutritivas. Sin embargo, este nutriente en el sistema acuapónico

estuvo dentro del rango óptimo sugerido por Rodríguez citado por Mendoza (2015); para cultivos de hoja en sistemas hidropónicos.

El zinc presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las etapas 2 y 3 ($0,0047 \pm 0,001$ y $0,02 \pm 0$ mg.L⁻¹, respectivamente); siendo mayor en la etapa 3 debido a que la adición de este nutriente fue mayor, además Rakocy (2002) señala que este elemento es acumulativo respecto al ingreso de alimento de los peces al sistema acuapónico.

El manganeso presentó mayor concentración en la etapa 2 ($0,1907 \pm 0,03$ mg.L⁻¹) a diferencia de la etapa 1 y 3. En las camas hidropónicas de control respectivas para cada etapa (2 y 3), la concentración final de manganeso fue mayor en estas que en el sistema acuapónico.

Los principales nutrientes para el crecimiento de lechuga se clasifican en macronutrientes; en los que se encuentran el nitrógeno, azufre, potasio, calcio y magnesio; y micronutrientes como boro, cobre, hierro, manganeso, zinc, molibdeno y cloro. Aunque este último no se menciona en la concentración de nutrientes de las soluciones nutritivas para cultivos hidropónicos de lechugas pero cumple una función importante que es explicado más adelante.

4.1.2. EVALUACIÓN DE OTROS NUTRIENTES EN LAS ETAPAS DE EXPERIMENTACIÓN

a. Cloruros

La concentración de cloruros (Figura 14) presentó diferencias significativas en las tres etapas de la experimentación ($p < 0,05$). A pesar que este micronutriente no está considerado en la solución nutritiva La Molina ni para cultivos de vegetales de hojas verdes, es un nutriente importante ya que influye en la absorción de nitrato tal como señalan Mills *et al.* citados por Ramírez *et al.* 2009. Además, Favela *et al.* (2006) mencionan que concentraciones mayores a 10 mg.L⁻¹ puede ser tóxico para el cultivo hidropónico, este valor es menor a las concentraciones obtenidas en las etapas 1 (141,17

$\pm 17,6 \text{ mg.L}^{-1}$), 2 ($200,08 \pm 15,1 \text{ mg.L}^{-1}$) y 3 ($68,63 \pm 4,1 \text{ mg.L}^{-1}$) del sistema acuapónico; sin embargo, las lechugas no presentaron quemaduras en el borde las hojas señalado por Marulanda (2003) como signo de toxicidad por cloro.

En la etapa 2, la concentración de cloruros fue menor en el sistema acuapónico ($200,08 \pm 15,1 \text{ mg.L}^{-1}$) que en el sistema hidropónico control ($269,5 \pm 28,6 \text{ mg.L}^{-1}$); en cambio en la etapa 3, los valores obtenidos fueron similares en ambos sistemas siendo ligeramente mayor en el sistema acuapónico ($68,63 \pm 4,10 \text{ mg.L}^{-1}$) que en el sistema hidropónico control ($58,58 \text{ mg.L}^{-1}$).

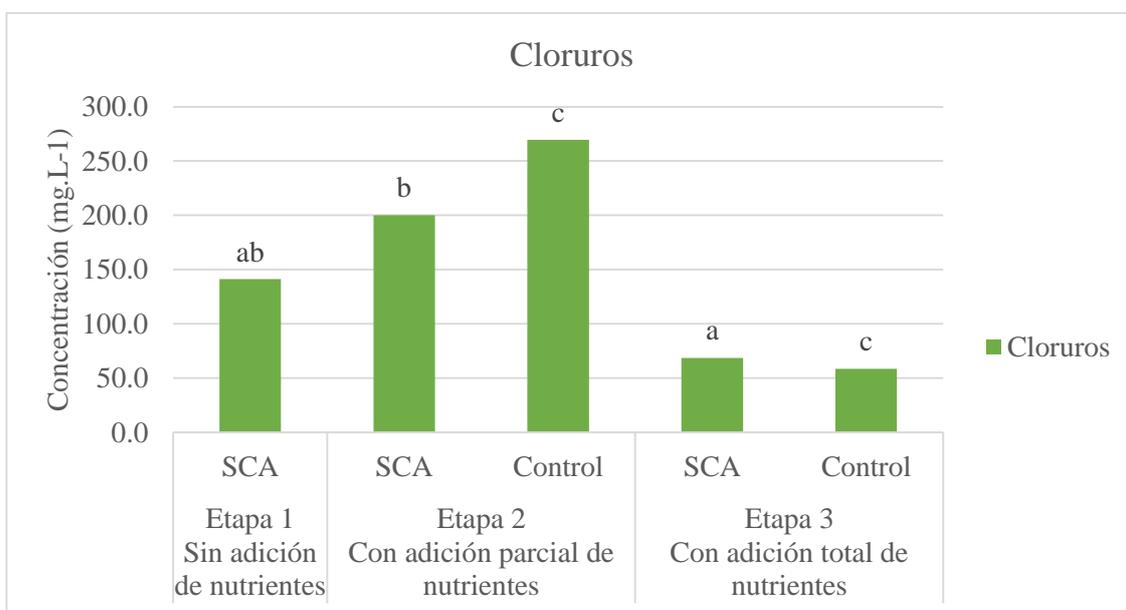


Figura 14: Valores de concentración final promedio de cloruro en el sistema acuapónico y el cultivo hidropónico control (Letras diferentes en las barras muestran diferencias significativas $p < 0,05$)

b. Sodio y bicarbonato

Como se mencionó en párrafos anteriores, sodio y bicarbonato no son considerados nutrientes indispensables en el cultivo de lechugas, específicamente el sodio es perjudicial para las plantas tal como lo indica Somerville *et al.* (2014). En la Figura 15, se observa las concentraciones obtenidas en la experimentación, en el caso del sodio presentó diferencias significativas en las tres etapas, siendo mayor en la etapa 2 ($99,97 \pm 6,6 \text{ mg.L}^{-1}$) pero menor respecto a la concentración del control ($142,98 \pm 4,03 \text{ mg.L}^{-1}$).

Los valores obtenidos en el sistema acuapónico y el sistema hidropónico de control (etapa 2) fueron mayores a lo indicado por Barros (s.f.), ya que señala que a concentraciones mayores a 70 mg.L^{-1} puede ser perjudicial para el cultivo; sin embargo en los sistemas de cultivo mencionados no presentaron síntomas de toxicidad por sodio como necrosis en los bordes de las hojas (Barros, s.f.) .

La concentración de bicarbonatos en el sistema acuapónico fue mayor en la segunda y tercer etapa ($127,69 \pm 2,5 \text{ mg.L}^{-1}$ y $123,42 \pm 13,8 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente) ya que se adicionaron iones OH en la forma del compuesto hidróxido de potasio, este compuesto permite equilibrar la alcalinidad y el pH del sistema de cultivo, el cual permitió una mejor absorción de los nutrientes en las plantas. A diferencia de la etapa 1, donde el valor promedio de bicarbonato fue $95,16 \pm 15,6 \text{ mg.L}^{-1}$ debido al proceso de nitrificación tal como lo señala Candarle (s.f.).

En relación a los valores de bicarbonatos obtenidos en el sistema acuapónico y el sistema hidropónico control se observa en la Figura 15, que en las etapas 2 y 3 de este último los valores promedio fueron mucho menor que en los sistemas acuapónicos.

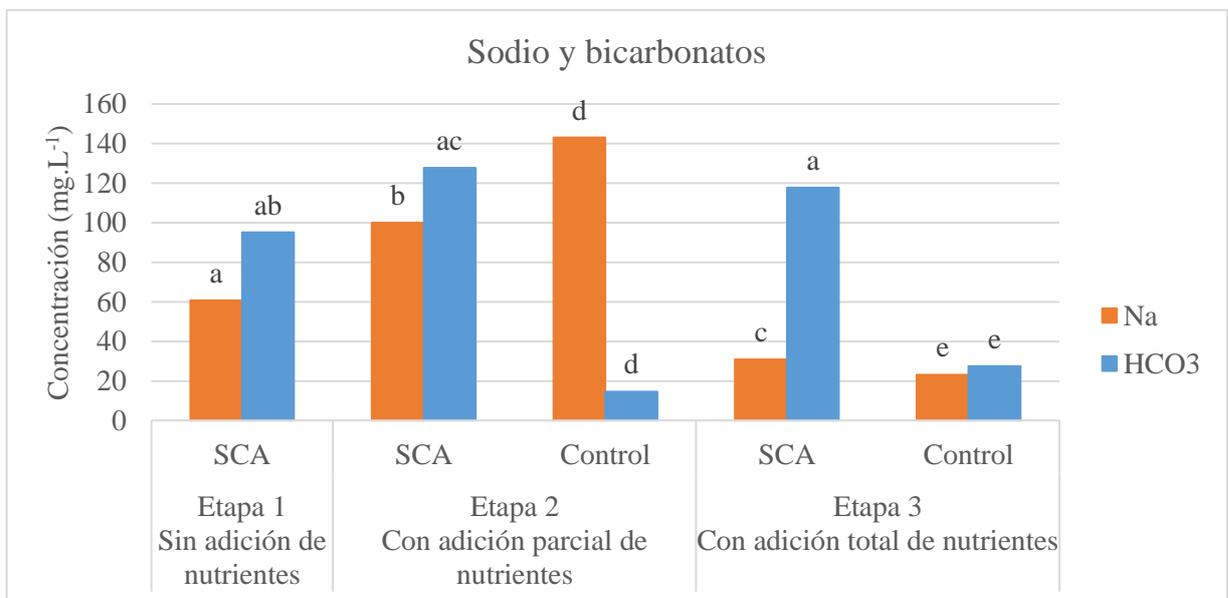


Figura 15: Valores de concentración final promedio de sodio y bicarbonato en el sistema acuapónico y el cultivo hidropónico control

4.1.3. CALIDAD DE AGUA EN EL SISTEMA ACUAPONICO

Los parámetros químicos y físicos durante las tres etapas del experimento se muestran en la Tabla 22, durante los tres horarios de muestreo por etapa y en los tres lugares de toma de muestra del sistema acuapónico como son los tanques de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA). Además, se compara con los valores obtenidos en el sistema hidropónico control.

Tabla 22: Valores promedio de calidad de agua en el sistema acuapónico

Parámetros	Hora	Etapas											
		E1				E2				E3			
		TP	SB	SCA	Control	TP	SB	SCA	Control	TP	SB	SCA	Control
Temperatura °C	9a.m.	22 ±	21,4 ±	20,9 ±	19,4 ±	25,4 ±	24,4 ±	23,3 ±	20,9 ±	25,1 ±	25,1 ±	24,2 ±	23,5 ±
		1,26 a	1,02 a	0,87 a	0,52	0,85 b	1,12 b	0,7 b	0,96 d	1,33 b	1,46 b	1,21 c	1,09
	12 m.	23,4 ±	22,7 ±	21,6 ±	19,6 ±	27,3 ±	26,6 ±	24,3 ±	21,8 ±	26,7 ±	27,2 ±	24,9 ±	24,1 ±
		1,67 a	1,28 a	0,98 a	0,57	1,19 b	1,7 b	0,99 b	1,15 d	1,65 b	1,8 b	1,37 b	1,2
	3p.m.	24,3 ±	23,8 ±	22,4 ±	20,3 ±	28,8 ±	28,1 ±	25,6 ±	22,7 ±	28,1 ±	28,5 ±	26 ±	24,9 ±
		1,75 a	1,46 a	1,2 a	0,74	1,22 b	1,52 b	1,13 b	1,12 d	1,6 c	1,63 b	1,48 b	1,27
OD (mg/L)	9a.m.	7,06 ±	7,46 ±	7,22 ±	7,41 ±	6,78 ±	6,18 ±	5,99 ±	6,78 ±	7,02 ±	6,66 ±	6,61 ±	7,93 ±
		0,89 a	0,71 a	0,77 a	0,48	0,97 a	0,9 b	0,93 b	1,38	0,64 a	0,62 c	0,65 c	0,75
	12 m.	6,8 ±	7,18 ±	7,1 ±	7,36 ±	6,64 ±	6,07 ±	5,95 ±	6,74 ±	6,23 ±	6,61 ±	6,57 ±	7,89 ±
		0,8 a	0,7 a	0,75 a	0,46	0,76 a	0,71 b	0,73 b	1,24	0,72 b	0,61 c	0,63 c	0,72
	3p.m.	6,58 ±	6,9 ±	6,93 ±	7,18 ±	5,55 ±	5,79 ±	5,69 ±	6,49 ±	5,29 ±	6,49 ±	6,45 ±	7,86 ±
		0,92 a	0,65 a	0,71 a	0,46	0,78 b	0,7 b	0,71 b	1,3	1,11 a	0,63 c	0,66 c	0,76
OD (%)	9a.m.	80,80 ±	84,32 ±	81,0 ±	80,7 ±	82,72 ±	72,57 ±	70,3 ±	75,65 ±	84,9 ±	79,3 ±	78,5 ±	93,2 ±
		9,06 a	7,47 a	8,59 a	5,39	12,12 ab	10,46 b	11 b	14,49	6,51 b	6,6 c	7,43 ac	7,76
	12 m.	79,53 ±	82,67 ±	79,2 ±	80,7 ±	82,86 ±	72,4 ±	70,3 ±	76,7 ±	77,0 ±	78,9 ±	78,1 ±	93,8 ±
		8,50 a	7,38 a	8,11 a	5,67	11,01 ab	9,07 b	8,63 b	13,4	7,52 ac	6,4 b	7,03 ac	7,34
	3p.m.	78,2 ±	81,5 ±	80,0 ±	79,6 ±	71,7 ±	71,5 ±	69,8 ±	75 ±	67,6 ±	79,9 ±	79,3 ±	94,6 ±
		9,60 a	7,08 ac	8,39 a	5,39	9,83 b	8,41 b	8,51 b	14,3	13,7 bc	7,07 c	7,3 ac	7,8
pH	9a.m.	7,6 ±	7,73 ±	7,62 ±	7,08 ±	7,73 ±	7,79 ±	7,6 ±	4,31 ±	7,56 ±	7,68 ±	7,69 ±	6,55 ±
		0,25 a	0,19 a	0,24ab	0,49	0,18 b	0,1 a	0,12 a	0,84	0,2 a	0,16 b	0,15 b	1,01
	12 m.	7,57 ±	7,72 ±	7,62 ±	7,02 ±	7,83 ±	7,81 ±	7,61 ±	4,32 ±	7,54 ±	7,68 ±	7,69 ±	6,54 ±
		0,23 a	0,18 a	0,26ab	0,56	0,24 b	0,11 b	0,13 a	0,86	0,19 a	0,17 a	0,16 b	0,99
	3p.m.	7,57±0,	7,74 ±	7,6 ±	7,0 ±	7,63 ±	7,8 ±	7,62 ±	4,32 ±	7,47	7,64 ±	7,67 ±	6,54 ±
		25 a	0,19 a	0,24 a	0,54	0,2 a	0,11 b	0,14 a	0,84	±0,19 b	0,17 c	0,17 a	1,02

...Continuación

Parámetros	Hora	Etapas											
		E1				E2				E3			
		TP	SB	SCA	Control	TP	SB	SCA	Control	TP	SB	SCA	Control
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	9a.m.	990,98 $\pm 54,4$ a	984,40 $\pm 50,8$ a	979,0 $\pm 48,6$ a	N.a	1541,52 $\pm 31,4$ b	1523,34 $\pm 150,2$ b	1541,24 $\pm 24,4$ b	2502,4 \pm 0,051	790,77 \pm 94,7 c	790,38 $\pm 92,8$ c	791,17 $\pm 92,7$ c	2051,7 \pm 115,5
	12 m.	999,28 $\pm 57,3$ a	976,93 $\pm 111,4$ a	980,7 $\pm 48,8$ a	N.a	1530,68 $\pm 38,3$ b	1532,85 $\pm 25,5$ b	1537,85 $\pm 26,9$ b	2502,6 \pm 0,049	794,26 \pm 94,3 c	789,73 $\pm 92,9$ c	791,20 $\pm 93,2$ c	2054,1 \pm 120,4
	3p.m.	1001,4 4 \pm 56,4 a	990,74 $\pm 53,3$ a	980,89 $\pm 49,7$ a	N.a	1541,69 $\pm 38,3$ b	1537,92 $\pm 26,6$ b	1543,23 $\pm 25,6$ b	2505,3 \pm 0,052	799,46 \pm 94,3 c	793,46 $\pm 93,0$ c	793,46 $\pm 93,0$ c	2055,9 \pm 118,3

OD: Oxígeno Disuelto TP: Tanque de Peces SB: Salida del Biofiltro SCA: Salida de la cama acuapónica. N.a.:No analizado

Letras diferentes en la misma fila muestran diferencias significativas ($p < 0.05$), la comparación se realizó por etapas entre los mismos puntos de muestreo.

a. TEMPERATURA

Los valores promedio más altos de temperatura del agua se registraron a las 3 p.m. en las tres etapas, fluctuando entre 22,4 a 28,5 °C. La temperatura aumentó con el paso de las horas ya que a las 9a.m. se registraron los valores más bajos, la variación de la fue de 21,4 a 25,4°C; presentando menores temperaturas en la etapa 1 (Tabla 22). En relación a los valores obtenidos en los diferentes lugares de muestreo del sistema acuapónico se observa que en los tanques de peces y salida de biofiltro las temperaturas son similares en todas las etapas, a diferencia de la salida de la cama acuapónica, siendo estas menores a las mencionadas. Esta diferencia se debe principalmente a que los tanques de los peces y biofiltros se encontraron dentro del invernadero y en el caso de los primeros se colocaron calentadores para el aumento de temperatura según lo requerido para la especie tilapia pues Balarin y Haller, Chervinski, Philippart y Ruwet citados por El-Sayed (2006) mencionan que el rango óptimo para el cultivo de esta especie varía de 25 a 30°C, contrario a los requerimientos de la lechuga ya que estas se desarrollan con temperaturas óptimas entre 18 a 23°C (señalados por Quintero *et al.*, 2000; Jacques y Hernández, 2005); por tal motivo las camas acuapónicas fueron colocadas fuera del invernadero, bajo sombra protegidas con malla raschel.

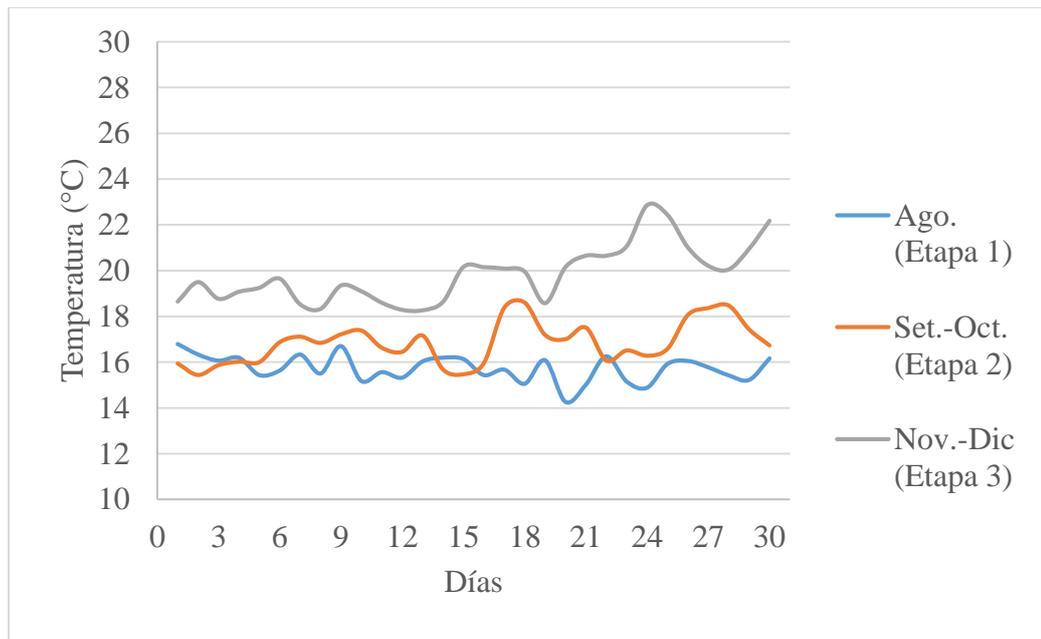


Figura 16: Variación de temperatura ambiental promedio durante las tres etapas de la investigación.

Los valores promedios de las temperaturas por etapa, en el mismo lugar de muestreo, indican que no existieron diferencias significativas entre la segunda y tercera etapa ($p>0,05$); sin embargo, si presentó diferencias significativas entre la primera etapa y las siguientes etapas ($p<0,05$). Las bajas temperaturas de la E1 estuvieron relacionadas con la temperatura ambiental ya que durante el mes de agosto (mes en el que se realizó la etapa 1) los valores variaron entre 14,26 y 16,79°C, siendo mayores en los meses de setiembre a diciembre con fluctuaciones entre 15,44 y 22,85 °C como se observa en la Figura 16.

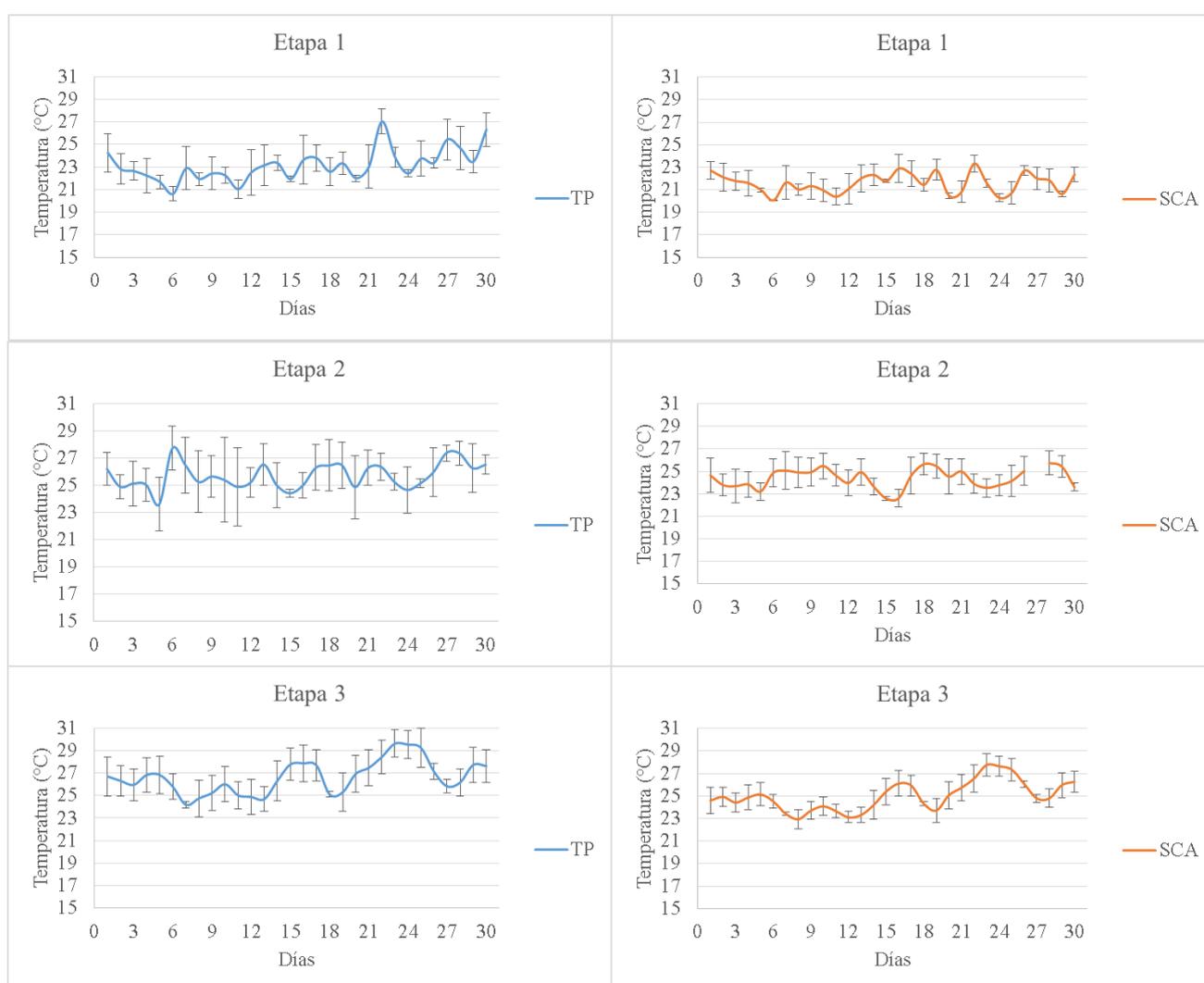


Figura 17: Variación de temperatura promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.

La Figura 17 presenta la variación de los valores promedios de temperatura durante los 30 días de cultivo en cada etapa en los puntos de muestreo tanque de peces y salida de la cama acuapónica, debido a que ambos componentes se encontraban en diferentes lugares, el primero bajo invernadero y el segundo fuera del invernadero. El rango de temperatura para la primera, segunda y tercera etapa en el tanque de peces fue 20,6-27; 23,6-27,7 y 24,1-29,6°C, respectivamente, los cuales coinciden con el rango óptimo para peces tropicales propuesto por Somerville (2014), 22-32°C. En cambio, en la salida de la cama acuapónica los valores de temperatura en cada etapa fueron 20,05-23,32; 22,6-25,7 y 22,9-27,8°C; siendo en la primera etapa donde se obtuvo el rango óptimo (18-23°C) para cultivo de lechugas sugeridos por Quintero *et al.*, 2000; Jacques y Hernández, 2005.

La temperatura registrada en las camas hidropónicas de control en cada etapa (Tabla 22) respecto a los valores registrados en las salidas de las camas acuapónicas, fueron menores. Las diferencias se presentaron porque el sistema hidropónico control sólo estuvo afectado por la temperatura ambiental; en cambio, las camas acuapónicas presentaron mayor temperatura pues el agua que llegaba a ellas provenía de los tanques de tilapia que estuvieron en el invernadero.

b. OXÍGENO DISUELTO (OD)

El oxígeno disuelto es un parámetro clave en los sistemas acuapónicos por estar relacionado con el proceso de nitrificación que permite el aporte nutrientes al componente vegetal y la remoción de compuestos tóxicos para los peces; los valores de la Tabla 22 muestran que la concentración promedio en el sistema acuapónico disminuyó durante el día, siendo mayor a los 9 a.m. con valores entre 5,99 y 7,46 mg.L⁻¹. Ésta variación de oxígeno se relaciona con la temperatura pues esta fue mayor durante la tarde ocasionando la disminución de concentración de oxígeno.

Durante la primera, segunda y tercera etapa del trabajo de investigación, en los tanques de peces, el rango de oxígeno disuelto promedio diario fluctuó entre 5,16-7,33; 5,32-7,26 y 5,36-7,43 mg.L⁻¹; respectivamente (Figura 18); los cuales son favorables para peces de agua cálidas según Somerville *et al.* (2014). Los valores más bajos corresponden a los

últimos días en cada etapa, atribuyéndose esta condición al incremento de la biomasa de peces. Asimismo, en sistemas acuapónicos, a niveles menores de 5 mg.L^{-1} no se realiza una buena nitrificación afectando la producción de nitratos y aumentando la toxicidad en el cultivo de los peces (Caló, 2011).

Respecto al porcentaje de saturación de oxígeno, de cada etapa de la experimentación, en el tanque de peces fue menor a las 3 p.m., siendo el valor más bajo en la etapa 3 con 67,6 por ciento; relacionado con el aumento de temperatura durante esta etapa; este valor difiere a lo recomendado por Panné y Luchini (2012) como óptimo para el cultivo de tilapia siendo 75 por ciento. La saturación de oxígeno menor a 75 por ciento se presentó durante la última semana de cultivo en las tres etapas de la experimentación (Figura 18), el cual podría afectar al consumo del alimento y al incremento de biomasa.

En el caso de los valores de oxígeno en la salida de la cama acuapónica estuvieron dentro del rango $>3 \text{ mg.L}^{-1}$ sugerido por Somerville *et al.* (2014); siendo el rango en la primera etapa 5,42-7,28; en la segunda etapa 5,75-7,43 y en la última etapa 5,07-7,2 mg.L^{-1} . Los rangos de oxígenos presentados en el tanque de peces y las camas acuapónicas fueron similares por tal motivo se considera que el cultivo de lechuga no estuvo afectado por los niveles de oxígeno.

Los valores de oxígeno de las camas hidropónicas de control (Tabla 22) disminuyeron a lo largo del día en las tres etapas debido al aumento de temperatura en horas de la tarde; estos valores comparados con el sistema acuapónico fueron ligeramente mayores a estos últimos debido a que en el sistema hidropónico cada cama contenía bombas sumergibles que movían el agua, además este sistema sólo estuvo afectado por el consumo de oxígeno realizado por las plantas en cambio el sistema acuapónico contenía tres factores que consumían oxígeno que son los peces, bacterias y plantas.

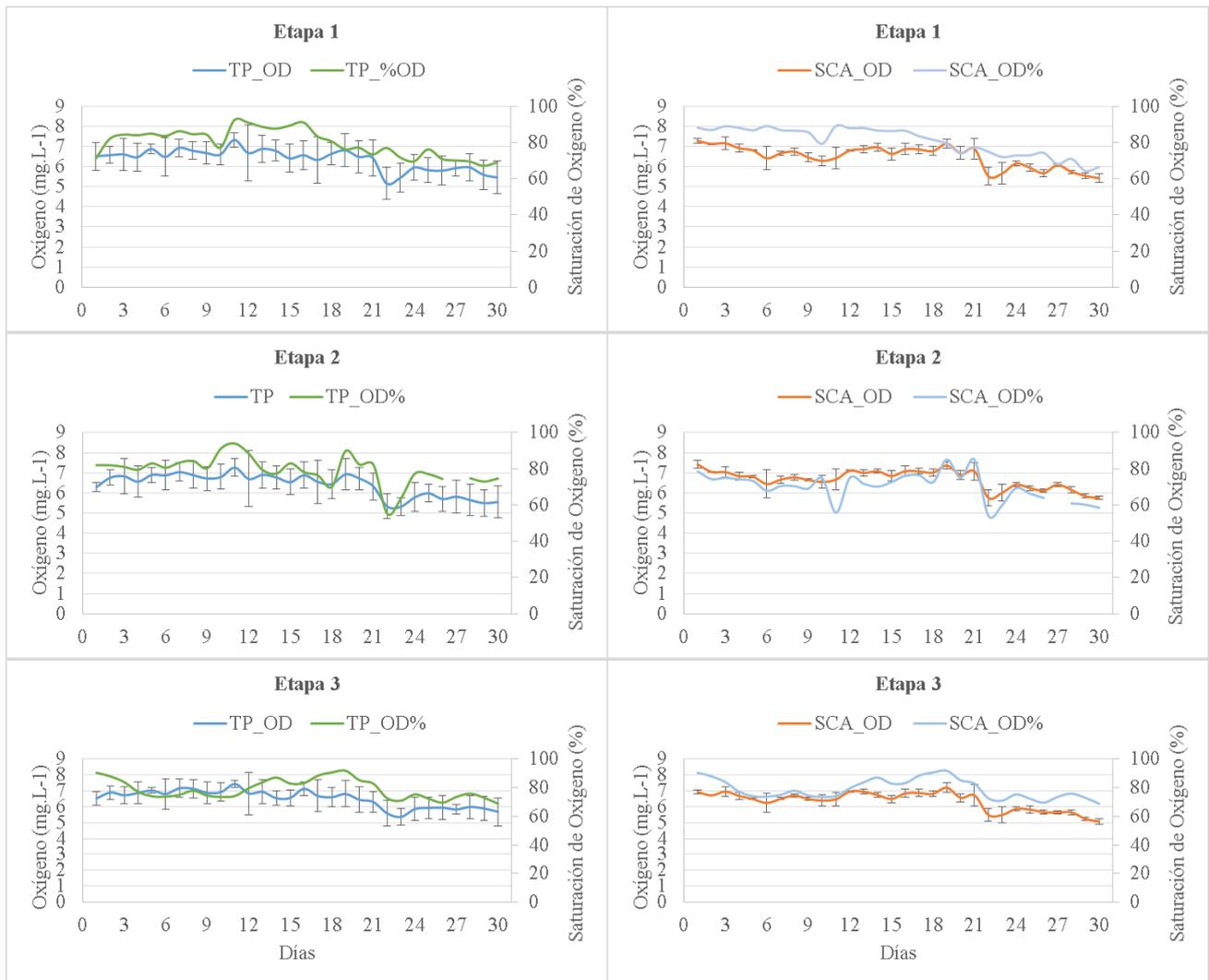


Figura 18: Variación del oxígeno disuelto (mg.L⁻¹) promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación

c. pH

Los valores promedio de pH (Figura 19) en las tres etapas de la investigación fluctuaron entre 7,18-7,94; en la primera etapa, 7,43-7,99; en la segunda y 7,26-7,92 en la tercera etapa en el tanque de los peces; estos estuvieron dentro del rango óptimo establecido por Saavedra (2006) que indica valores de pH 6.5 a 9 en los cultivo de tilapia. En el caso de los valores de pH en la salida de la cama acuapónica fueron 7,15-8,08 (etapa 1), 7,36-7,86 (etapa 2) y 7,34-8,08 (etapa 3); siendo estos valores mayores a los sugeridos por Somerville *et al.* 2014 (5,5-7,5), quién además señala que a pH mayor a 7,5 se dificulta la disponibilidad de los nutrientes hierro, fósforo y manganeso para las plantas.

Los valores de pH cercanos a 8 se registró al inicio de cada etapa debido al contenido del agua utilizada, el cual fue descendiendo (etapa 1), este comportamiento es característico debido a los procesos metabólicos de los peces y plantas que producen dióxido de carbono por la respiración.

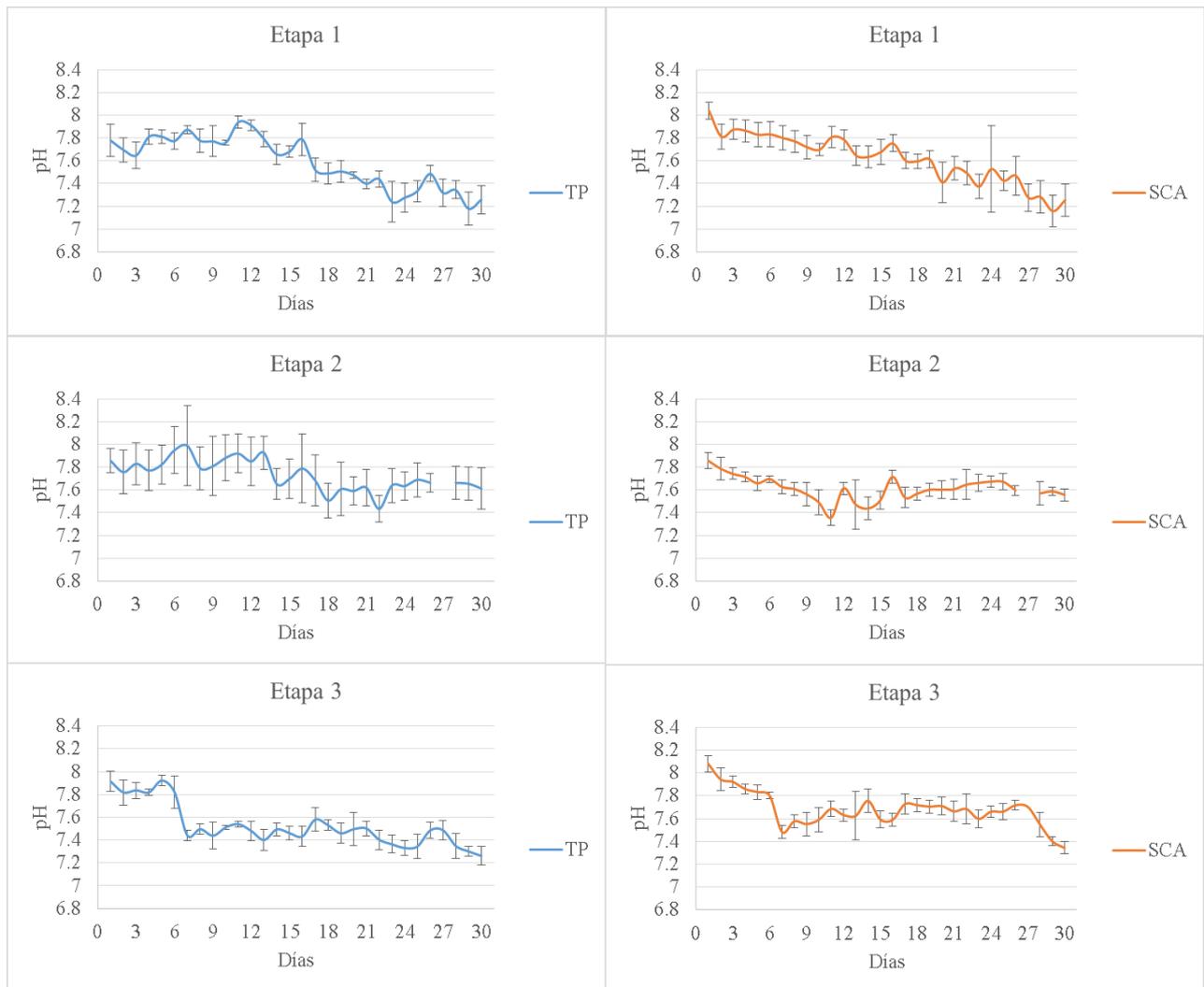


Figura 19: Variación del pH promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación

En la Figura 19, se observa que en la segunda y tercera etapa la variación del pH fue menor debido a que durante estas etapas se adicionó hidróxido de potasio, el cual permitió estabilizar los valores de pH durante el tiempo de cultivo en las dos últimas etapas.

El sistema hidropónico de control presentó valores de pH alrededor de 7 (etapa 1); 4,3 (etapa 2) y 6,5 (etapa 3) como se observa en la Tabla 22. Los valores obtenidos en la etapa 1 y 3 coinciden con lo sugerido por Somerville (2014) para el cultivo de plantas; sin embargo, en la etapa 2, el pH fue alrededor de 4,3 lo cual no afectó el crecimiento de las lechugas, como se explicará más adelante.

d. ALCALINIDAD

Los valores de alcalinidad promedio diario en cada etapa de la investigación se muestran en la Figura 20, en la primera etapa la alcalinidad disminuyó hacia el final del cultivo en el tanque de peces y en la salida de la cama acuapónica. Mientras que, en la etapa 2 se observa una disminución hasta finalizar la segunda semana, aumentando la concentración a partir de la tercera semana. En cambio, en la etapa 3, los valores de alcalinidad no presentaron mayor variación durante los 30 días de cultivo en el sistema acuapónico. Las diferencias presentadas en cada etapa están relacionados con la adición de nutrientes en la segunda y tercera etapa. Según Rakocy (2006), el proceso de nitrificación produce acidificación en el medio de cultivo consumiendo alcalinidad, tal como ocurrió en la primera etapa. Por lo tanto, Somerville (2014) sugiere agregar bases para aumentar la alcalinidad, en el presente trabajo realizado se adicionó hidróxido de potasio (KOH) con el objetivo de neutralizar los ácidos producidos por la nitrificación y al mismo tiempo aportar potasio al cultivo acuapónico.

La adición del hidróxido de potasio en la etapa 2 fue a los 15 días de cultivo, punto en el que se observa el incremento de alcalinidad de 60 hasta 72 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ en los tanques de peces y de 61 hasta 65,3 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ en las camas acuapónicas (Figura 20). En la etapa 3, la alcalinidad no varió significativamente, ya que el hidróxido de potasio fue adicionado al inicio de esta etapa manteniéndose en promedio 83 $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ durante todo el experimento. El efecto de la corrección de la alcalinidad también se vio reflejado en los valores de pH de las etapas 2 y 3.

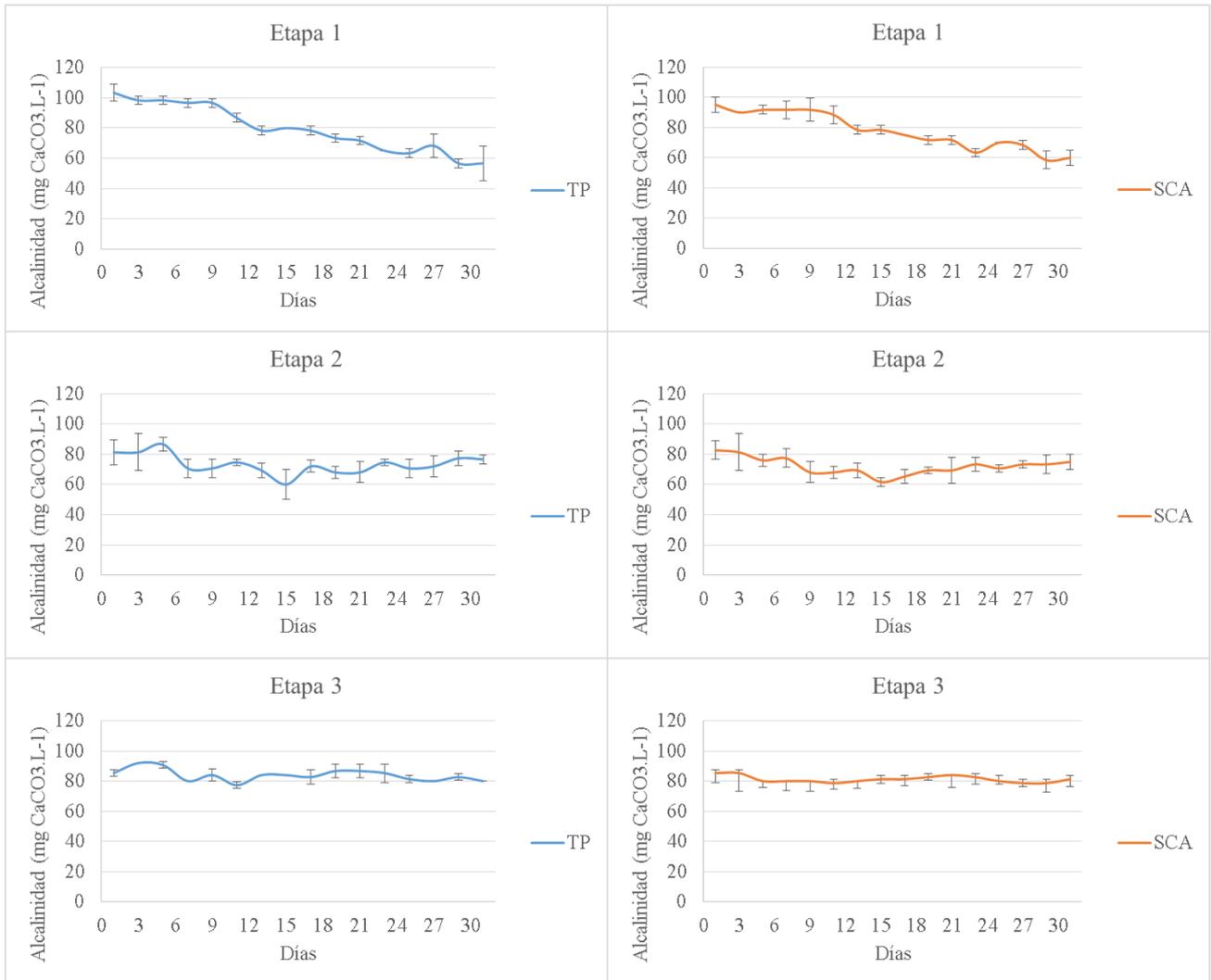


Figura 20: Variación de la alcalinidad promedio del tanques de peces (TP) y salida de la cama acuapónica (SCA) del sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación.

e. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (k)

La conductividad eléctrica, durante el desarrollo de las tres etapas de la investigación, incremento sus valores iniciales (Figura 21). Este incremento principalmente se da por el ingreso de alimento diario, tal como lo indica Rakocy (2002) que la conductividad eléctrica aumentó constantemente mientras se incrementaba la cantidad de alimento adicionada al sistema. En la segunda etapa se presentó mayor niveles de conductividad eléctrica respecto a la primera y tercera etapa. Esto podría estar relacionado con las concentraciones de Ca y Mg que fueron mayores en la segunda etapa, ya que estos son

algunos de los nutrientes que contribuyen al incremento de la conductividad (New Alchemy Institute, Head, McMurtry, Parker *et al.*, Rakocy citados por Rakocy, 2002).

En relación al sistema hidropónico de control, la conductividad eléctrica determinada en las etapas 2 y 3 fueron casi constante con variaciones mínimas durante el día (Tabla 22), siendo mayor en la etapa 2 ($2502,4 \pm 0,05 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) debido a que la disponibilidad de nutrientes es constante pues la solución nutritiva es añadida al inicio del cultivo. La diferencia mostrada entre las etapas 2 y 3 puede estar relacionada con el tipo de solución nutritiva utilizada, ya que en la etapa 2 se utilizó solución nutritiva en sales y en la etapa 3, solución nutritiva en líquido.

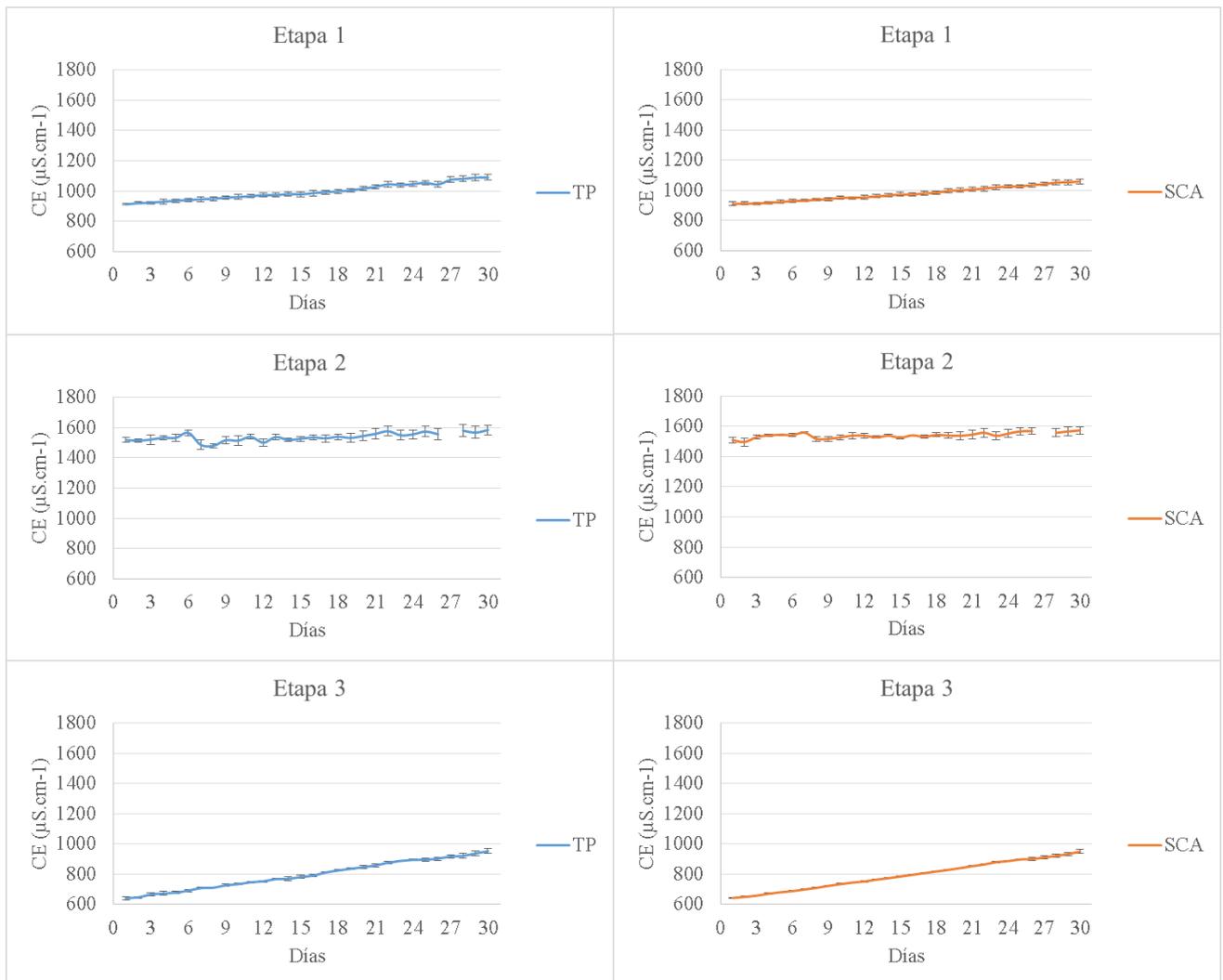


Figura 21: Variación de conductividad eléctrica promedio ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) en el sistema acuapónico en las tres etapas de la investigación

f. NITRÓGENO AMONIAICAL TOTAL (NAT)

Se observa en la Figura 22 que los valores de nitrógeno amoniacal total (NAT) en los tanques de peces (TP), durante las tres etapas, fue ligeramente mayor que en la salida del biofiltro (SB) y salida de las camas acuapónicas (SCA) debido a que en los tanques se encuentran la mayor cantidad de desechos producidos por la excreción de los peces y la descomposición del alimento no consumido. Los niveles NAT en los tanques de peces fue menor a $1,6 \text{ mg.L}^{-1}$, el cual se encuentra por debajo de los niveles sugeridos por Somerville (2014) para peces de aguas cálidas (3 mg.L^{-1}).

Los valores de pH en los componentes tanque de peces, biofiltro y camas acuapónicas fueron mayores a 7 (Tabla 22), el cual sobrepasa el rango óptimo sugerido por Somerville (2014) para sistemas acuapónicos pudiendo afectar al proceso óptimo de nitrificación en el sistema pues como se observa en la Figura 22 los valores de NAT en la salida de la cama acuapónica no difieren significativamente de lo registrado en los tanques de peces.

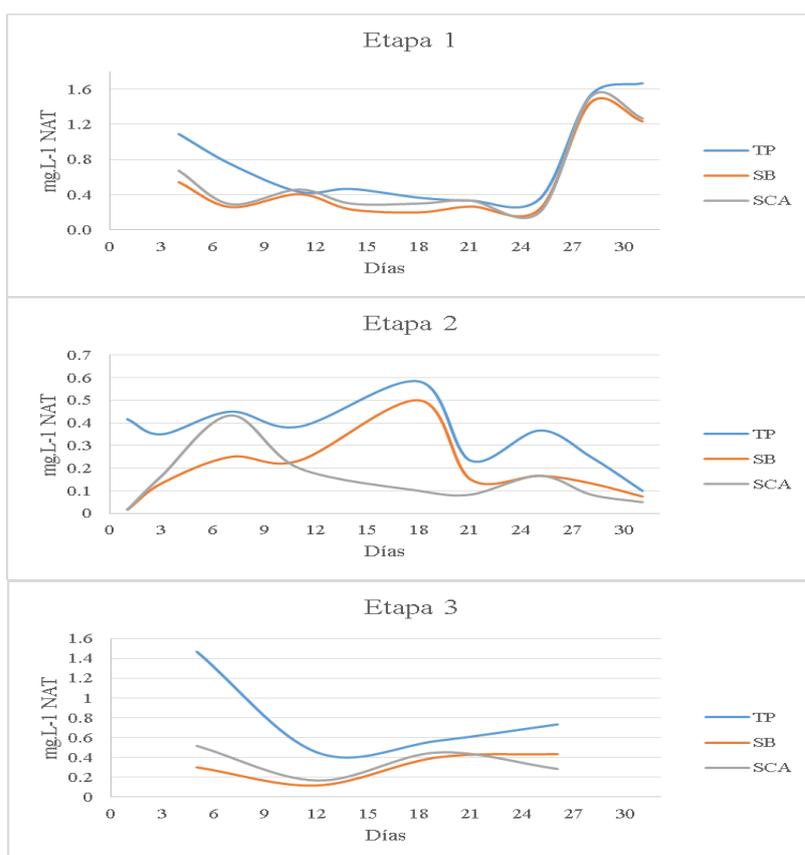


Figura 22: Variación de nitrógeno amoniacal total (mg.L^{-1}) en las tres etapas en el tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).

g. NITRITOS

La concentración de N-NO_2 en la segunda y tercera etapa en el tanque de peces (TP), salida de biofiltro (SB) y salida de cama acuapónica (SCA); fue disminuyendo al transcurrir los días, a diferencia de la primera etapa (Figura 23), en el cual los valores en el tanque de peces fueron mayores a un miligramo por litro hasta el final de la experimentación. Estas concentraciones en la primera etapa pudieron afectar a los peces, causando estrés y por lo tanto la disminución en la alimentación ya que como señala Somerville *et al.*, 2014, el rango óptimo para cultivos acuapónicos es menor a un miligramo por litro. A pesar de ello, el incremento de biomasa en E1 fue mayor que en la E2 debido a que este último también presentó valores mayores a un miligramo por litro entre la segunda y tercera semana de la experimentación.

Los valores promedios obtenidos para todo el sistema fueron menores a cinco miligramos por litro, indicado por Rakocy, Losordo citados por Bernuy (2014) como nivel tóxico para tilapia por lo que la sobrevivencia no fue afectada, como se explicará más adelante.

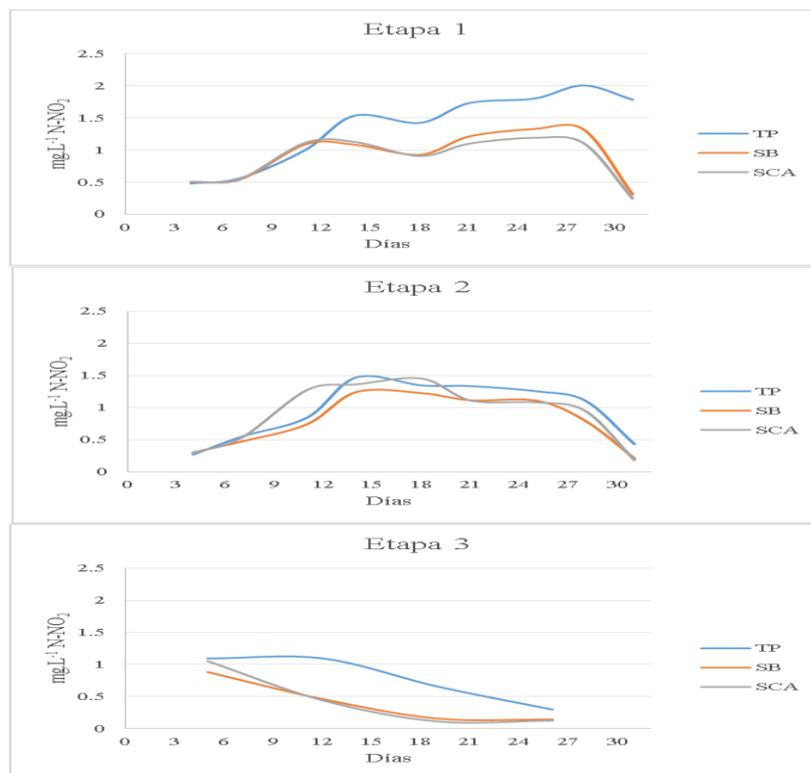


Figura 23: Variación de nitritos (mg.L^{-1}) en las tres etapas tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).

h. NITRATOS

La concentración de N-NO₃ incrementó conforme avanzó los días, durante las tres etapas (Figura 24), el rango de N-NO₃ fue 11,2-30,7 mg.L⁻¹, la fluctuación de las concentraciones de nitrato entre las tres etapas de la investigación fue similar. Estas concentraciones estuvieron muy por debajo de la concentración de nitratos que afectan el consumo de alimento en el cultivo de tilapia según Rakocy *et al.* (2000).

El nitrógeno es el principal componente que las plantas necesitan para su crecimiento, las cuales absorben este nutriente en forma de nitrato (Marulanda, 2003); por ello Rakocy (2002) sugiere el rango de 1 a 100 mg.L⁻¹ en cultivos acuapónicos. Este rango incluye a los valores obtenidos en las tres etapas de la investigación; sin embargo, Rodríguez citado por Mendoza (2015) indica que para cultivos de hoja en hidroponía es necesario niveles de nitrógeno entre 150-200 mg.L⁻¹.

Considerando sólo la producción de N-NO₃ en el sistema acuapónico se observa un valor residual que está disponible en las camas acuapónicas del cultivo de lechuga; sin embargo, Rodríguez citado por Mendoza (2015) indica que los cultivos de hojas absorben el nutriente de nitrógeno en las formas de NO₃⁻ y NH₄⁺.

Las concentraciones promedio de N-NO₃ obtenidos en las tres etapas del presente estudio (23,1; 22 y 20,2; respectivamente) fueron similares a lo reportado por Pineda-Pineda *et al* (2018) y Al-Hafedh *et al.* citados por Delaide (2017) en sistemas acuapónicos, siendo 25 y 20 mg.L⁻¹, respectivamente.

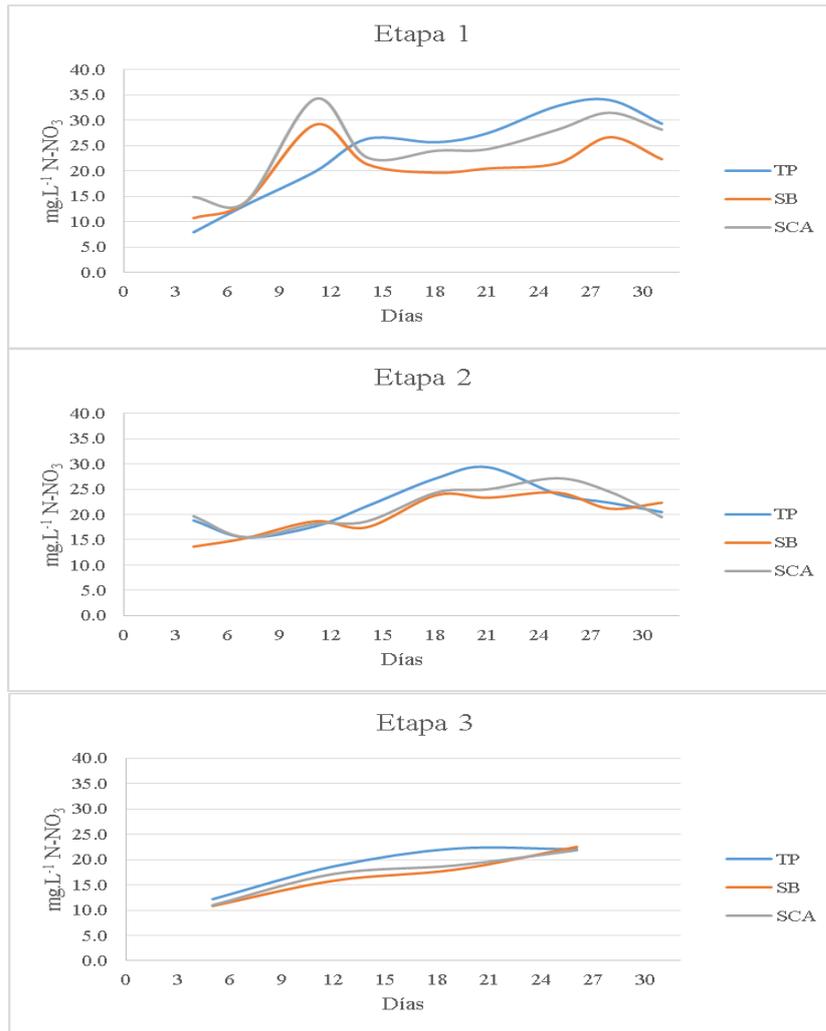


Figura 24: Variación de nitratos en las tres etapas tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA)

i. FOSFATOS

La variación de la concentración de fósforo reactivo durante la experimentación se puede observar en la Figura 25. Las concentraciones bajas de fosfatos se dieron en los primeros días aumentando su concentración hasta el final de la experimentación, debido a que este nutriente se acumula dependiendo de la cantidad de alimento que ingresa al cultivo (New Alchemy Institute, Head, McMurtry, Parker *et al.*, Rakocy citados por Rakocy, 2002).

Los rangos de concentración para la primera, segunda y tercera etapa fueron 2,2-7,8; 3,2-8,8 y 1,8-6,96 mg.L⁻¹ respectivamente. Este nutriente es esencial para el crecimiento de lechugas y la formación del cogollo por lo que se sugiere niveles de 35 mg.L⁻¹ (Rodríguez

citado por Mendoza, 2015). Sin embargo, los sistemas acuapónicos registran valores entre 1-17 mg.L⁻¹ PO₄-P (Delaide, 2017), los cuales fueron obtenidos en el presente estudio.

A pesar que los valores obtenidos fueron menores a 35 mg.L⁻¹ no se presentó características de deficiencia de fósforo coloración verde oscura con tintes purpúras (Rincón citado por Jaramillo, 2016).

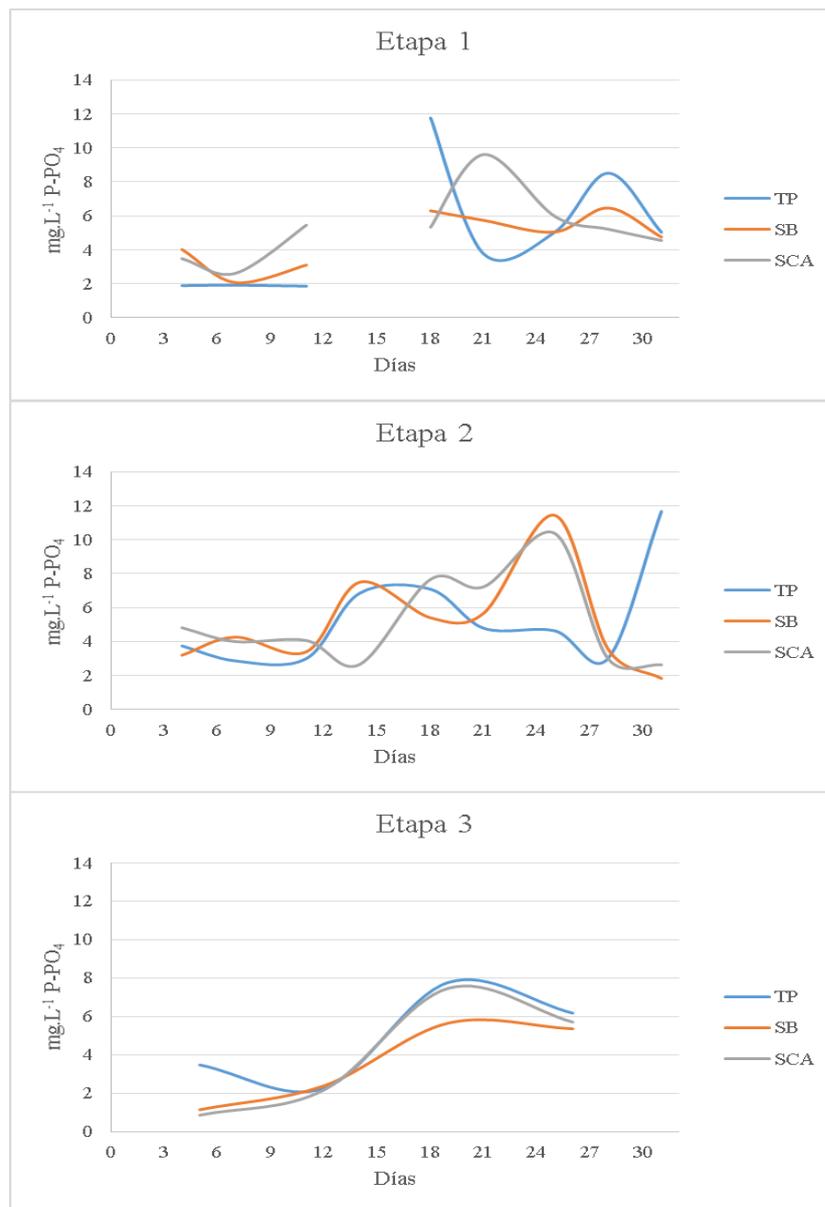


Figura 25. Variación de fosfatos en las tres etapas del Sistema acuapónico tanque de peces (TP), salida del biofiltro (SB) y salida de la cama acuapónica (SCA).

4.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA EN EL SISTEMA ACUAPONICO

4.2.1. PECES

En la Tabla 23 se presentan los valores promedios y desviación estándar de los parámetros de producción de la especie Tilapia alcanzados después de 30 días de experimentación en el cultivo de sistema acuapónico que consistió en tres etapas; etapa 1 (cultivo sin adición de nutrientes deficitarios), etapa 2 (cultivo con adición de nutrientes deficitarios a partir de la tercera semana) y etapa 3 (cultivo con adición de nutrientes deficitarios desde el inicio de la experimentación).

Tabla 23: Valores promedio de los parámetros de producción del cultivo de tilapia

Producción de peces	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Biomasa inicial (kg.m ⁻³)	5	5	5
Peso inicial promedio (g)	175,8 ± 8,9	265,1 ± 24,5	162,2 ± 45,1
Peso final promedio (g)	234,6 ± 22,1	335,9 ± 30,7	207,9 ± 44,2
Biomasa final promedio (kg.m ⁻³)*	6,7 ± 0,15 a	6,6 ± 0,44 a	7,9 ± 0,31 b
Incremento de biomasa promedio (kg.m ⁻³)	1,67 ± 0,16	1,39 ± 0,37	2,9 ± 0,33
Tasa de crecimiento específica (SGR, %.día ⁻¹)	0,96 ± 0,08	0,78 ± 0,18	1,53 ± 0,15
Sobrevivencia (%)	100	100	100
Factor de condición (K)	1,71 ± 0,04	1,17 ± 0,07	1,69 ± 0,03
Total de alimento entregado (kg)	1,14 ± 0,09	1,1 ± 0,12	1,9 ± 0,07
Factor de conversión alimenticia (FCR)	1,62 ± 0,07	1,92 ± 0,32	1,52 ± 0,12

*Letras diferentes muestran diferencias significativas p<0,05.

Durante las tres etapas que duró la investigación se observó, Tabla 23, un incremento de biomasa durante los 30 días de cultivo, siendo mayor en la etapa 3. Los valores de biomasa final indican que no existieron diferencias significativas entre las etapas 1 y 2 (p>0,05), siendo ligeramente mayor en la etapa 1, en cambio mostraron diferencias significativas entre las etapas 1 y 3 (p<0,05), lo mismo ocurre entre las etapas 2 y 3 (p<0,05); siendo mayor este último (7,9 ± 0,31 kg.m⁻³). Esta diferencia de biomasa promedio (Figura 26) podría explicarse, ya que en la etapa 3 la temperatura fue mayor que en las etapas previas y por lo tanto hubo mayor consumo de alimento. Además, como se indicó en párrafos anteriores, los peces de la primera etapa pudieron presentar situaciones de estrés debido al alto contenido de nitritos en la última semana del cultivo.

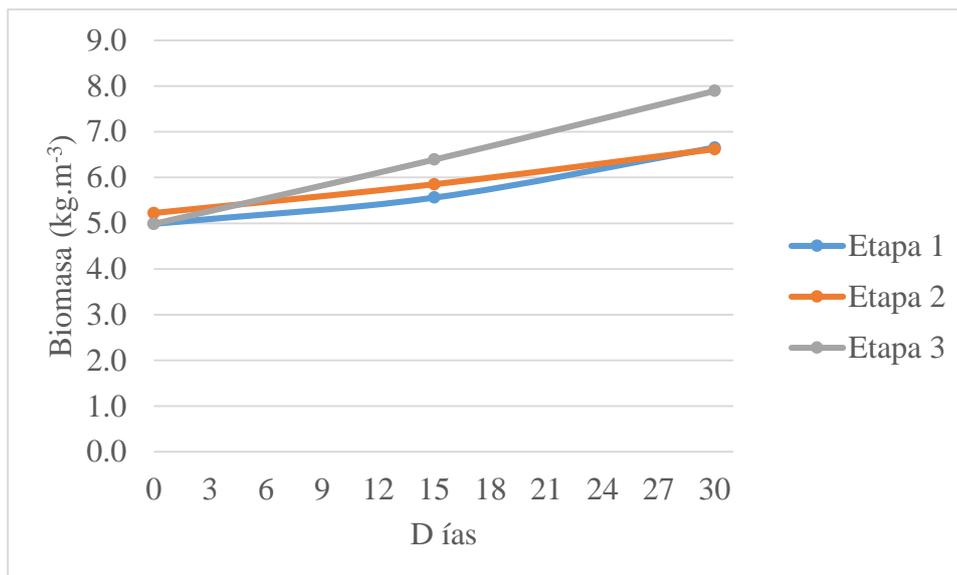


Figura 26. Variación de la biomasa promedio en cada etapa de la investigación.

Respecto a la tasa de crecimiento específica (TCE) en el cultivo acuapónico, el mayor valor se presentó en la etapa 3 ($1,53 \pm 0,15 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$) y fue mucho menor en la etapa 2 ($0,78 \pm 0,18 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$); el cual podría relacionarse con el peso inicial promedio de los peces. Esta diferencia se considera que no fue afectada por la adición de nutrientes ya que en la etapa 3 la concentración de nutrientes añadidos al sistema acuapónico fue mayor que en la etapa 2.

La tasa específica de crecimiento en la etapa 3 fue adecuada para el cultivo de tilapia en SRA, según lo reportado por Aguilar (2010) quién obtuvo valores similares de TCE ($1,326 \pm 0,028 \text{ \%}\cdot\text{día}^{-1}$) para peces con peso promedio inicial de $137 \pm 4,11 \text{ g}$ y alimentados con 31,2 por ciento de proteína.

La sobrevivencia obtenida durante toda la investigación fue la misma en las tres etapas (100 por ciento). Esta no fue afectada por niveles de nitritos de la primera y segunda etapa debido a que la especie tilapia puede tolerar niveles altos durante periodos largos según Abdalla *et al.* citados por Ingle de la Mora *et al.* (2003).

En relación al factor de condición (K) para el sistema acuapónico, los valores obtenidos fueron similares entre las etapas 1 ($1,71 \pm 0,04$) y 3 ($1,69 \pm 0,03$) presentando menor valor en la etapa 2 ($1,17 \pm 0,07$); sin embargo, en las tres etapas este parámetro fue similar a lo

obtenido por Aguilar (2010) en un cultivo de tilapia en sistema de recirculación siendo $1,94 \pm 0,03$ en la fase de crecimiento 2.

En cuanto al alimento entregado, este fue mayor en la etapa 3 y hubo menor consumo de alimento en la etapa 2. El factor de conversión alimenticia fue menor en la etapa 3, por lo tanto hubo mejor aprovechamiento del alimento por lo peces lo que se reflejó en el incremento de la biomasa. El valor de FCR, son similares a los obtenido por Arnulfo (2015) en el cultivo de tilapia en sistema de recirculación.

4.3. EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN EL SISTEMA ACUAPONICO

4.3.1. LECHUGAS

Durante las tres etapas que se desarrollaron en la investigación, la producción de lechuga, presentó mayor incremento en la etapa 2. No existieron diferencias significativas entre los promedios de los incrementos de peso de las etapas 1 y 3 ($p > 0,05$), siendo el promedio de la etapa 1 mayor a la etapa 2. Por otro lado, si presentaron diferencias significativas entre el incremento de peso promedio de las etapas 2 y 3; 1 y 2, $p < 0,05$, siendo mayor, en la etapa 2; en el cual se adicionó los nutrientes potasio, hierro, manganeso, cobre, zinc y molibdeno, en los 15 días de cultivo. Sin embargo, en la etapa 3, no se obtuvieron los resultados esperados a pesar que los nutrientes que favorecen al crecimiento de lechuga se adicionaron al inicio de la etapa 3, los resultados podrían vincularse con las condiciones de siembra de las plántulas ya que el peso inicial de cada plántula de lechuga fue menor comparado con las etapas previas lo que podría haber afectado en el crecimiento de las lechugas (Tabla 24).

Por otro lado, el cultivo de lechuga del sistema acuapónico contó con un sistema control hidropónico, los resultados muestran (Figura 28) que en el sistema acuapónico sin adición de nutrientes el peso total obtenido es menor en aproximadamente 2 Kg a diferencia de la etapa 2 con adición de nutrientes, en el cual la producción hidropónica es mayor que en la acuapónica pero sólo en aproximadamente 1 Kg. Además, en la etapa 3, con relación al sistema control; a pesar de no obtener los resultados deseados en el crecimiento de lechuga

se observa en la Figura 27 que en el sistema acuapónico hubo mejor crecimiento que en sistema control, en el cual muchas lechugas murieron, esto podría relacionar con la cantidad de nutrientes que brinda el sistema acuapónico pues es gradual a diferencia del sistema control que la concentración inicial de cultivo es alta que pudo afectar a las plántulas pequeñas.

Los valores registrados para la longitud de raíz variaron entre 34,9 y 46,1 cm siendo estos resultados mayores a los obtenidos por Moreno (2014), en sistemas acuapónicos usando la técnica NFT.

El peso promedio total final de la producción de lechugas en la etapa 2 fue similar a la obtenida por Licamele (2009) en un sistema acuapónico con 5 Kg.m^{-3} de peces durante 35 días.

La Figura 28, muestra la comparación del crecimiento de lechugas en la etapa 3, entre el sistema acuapónico y el sistema hidropónico control, donde se obtuvo mejor crecimiento en el primer sistema, ya que no se presentó mortalidad de lechugas y el crecimiento fue ligeramente homogéneo; a diferencia del sistema hidropónico control, en el cual hubo mortalidad de lechugas y mayor variabilidad de altura entre las plantas. El bajo crecimiento y mortalidad de las lechugas en el sistema hidropónico control podría estar relacionado con el tamaño de las plántulas del trasplante y la concentración de nutrientes estacionario que inicia este sistema, contrario al sistema acuapónico, donde la concentración de nutrientes durante todo el experimento varía diariamente en relación al aporte del cultivo de peces (consumo de alimento y excreción de peces).

En relación a lo obtenido en la etapa 3, se podría asumir que el sistema acuapónico permite la producción de plantas pequeñas a las sugeridas para el inicio de trasplante final en sistemas hidropónicos, ya que como se observó en esta etapa las lechugas no obtuvieron el peso deseado pero no hubo mortalidad comparada con el sistema hidropónico de control.

Sistema acuapónico con adición de nutrientes desde el inicio del cultivo

Sistema hidropónico control



Figura 27: Comparación del crecimiento de lechugas, etapa 3, en sistema acuapónico y sistema hidropónico control.

Tabla 24: Indicadores de crecimiento en lechugas

Producción de lechugas	Peso promedio fresco			Incremento de peso promedio total (kg.m ⁻³)	Altura promedio por planta (cm)	Longitud de raíz promedio por planta (cm)	Número de hojas promedio por planta	Rendimiento total (kg.m ⁻²)
	Inicial por planta (g)	Inicial total (Kg)	Final total (kg)					
Etapa 1	5,57 ± 1,4	0,111 ± 0,007	1,47 ± 0,7	1,36 ± 0,7	15,5 ± 2,7	34,9 ± 6,0	24,23 ± 3,9	1,09 ± 0,5
Etapa 2	5,11 ± 1,4	0,102 ± 0,02	3,18 ± 0,6	3,07 ± 0,6	20,8 ± 1,8	46,1 ± 6,5	23,5 ± 1,9	2,4 ± 0,6
Etapa 3	0,64 ± 0,1	0,013 ± 0,0008	0,60 ± 0,1	0,59 ± 0,1	15,8 ± 0,9	35,9 ± 0,6	10,5 ± 0,3	0,45 ± 0,09
Control (E1)	5,03 ± 1,4	0,10 ± 0,002	3,47 ± 0,4	3,37 ± 0,4	23,9 ± 2,1	39,7 ± 7,5	22,8 ± 3,1	2,2 ± 0,2
Control (E2)	4,02 ± 1,4	0,08 ± 0,01	4,38 ± 0,1	4,30 ± 0,2	22,9 ± 3,1	33,9 ± 6,5	17,1 ± 1,8	2,8 ± 0,2
Control (E3)	0,63 ± 0,18	0,0125 ± 0,002	0,33 ± 0,1	0,32 ± 0,1	12,05 ± 1,9	14,14 ± 1,3	10,4 ± 0,9	0,21 ± 0,09

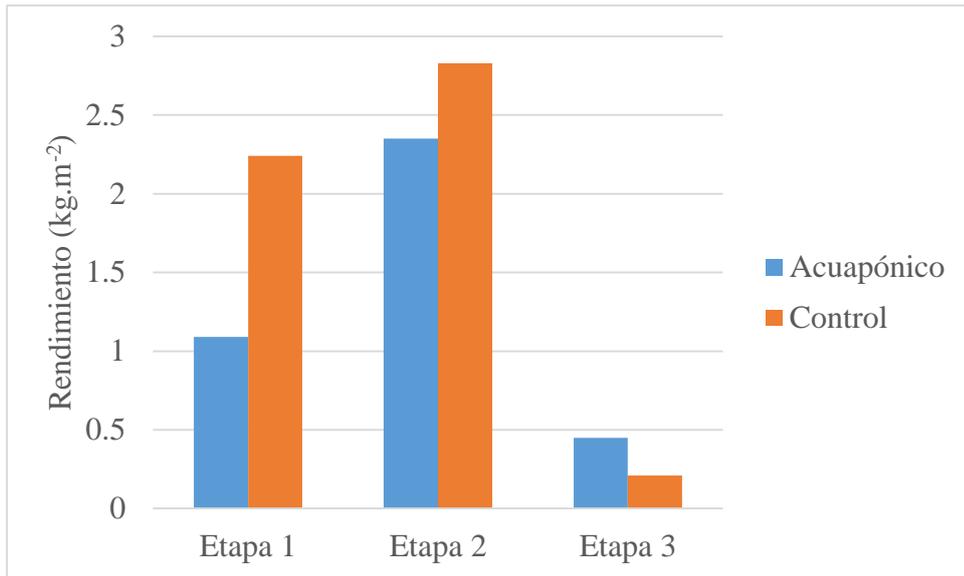


Figura 28. Rendimiento promedio de lechugas acuapónicas y control en cada etapa del trabajo

V. CONCLUSIONES

1. Los macro y micronutrientes identificados en bajas concentraciones en el sistema acuapónico, bajo las condiciones del experimento, fueron potasio (en el caso de macronutrientes) y hierro, cobre, zinc y manganeso (en el caso de micronutrientes).
2. La adición continua de nutrientes no afectó los parámetros de producción de los peces como supervivencia, factor de conversión alimenticia (FCR) e incremento de biomasa. Al igual que los parámetros de crecimiento como tasa de crecimiento específica y factor de condición.
3. La producción de lechuga mejoró en apariencia y peso al adicionar los nutrientes deficitarios. Sin embargo, bajo las condiciones del experimento, la producción en el sistema hidropónico fue mayor que en sistema acuapónico.
4. El sistema acuapónico, bajo las condiciones experimentales descritas, permitió mantener los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto y pH para el crecimiento de peces y lechugas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda en futuras investigaciones realizar pruebas de cultivo de lechuga en el ciclo completo del cultivo de tilapia, ya que la cantidad de proteína es diferente para cada estadio del pez y así conocer en que estadio se obtiene mayor producción y calidad de lechugas.
2. Es recomendable realizar pruebas con densidades mayores a la utilizada en la presente investigación tanto para peces como lechugas y con diferentes sistemas hidropónicos.
3. Se recomienda cuantificar el aprovechamiento de los nutrientes en cada componente del sistema acuapónico, peces y vegetales.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, F. (2010). Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja *Oreochromis spp* y tilapia nilótica *Oreochromis niloticus* Var. Chitralada alimentadas con dietas peletizadas o extruídas. Tesis Mag. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 135 p.
- Arnulfo, M. (2015). Evaluación de los parámetros productivos y de calidad de agua en el cultivo de tilapia *Oreochromis niloticus* en sistemas de recirculación cerrada en laboratorio. Informe final. Callao, Perú, Universidad Nacional del Callao. 63 p.
- Bañuelos, JR. (2017). Acuaponía: Parámetros básicos de diseño. Monografía Med. Vet. Zoo. Coahuila México, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 68 p.
- Barros, P. (s.f.) ¿La Hidroponía? ...pero si es muy fácil. 47 p.
- Bautista, M. (2000). Evaluación del rendimiento de cuatro variedades de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en cultivo hidropónico, utilizando como sustrato arena y a cascarilla de arroz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 57 p.
- Beltrano, J; Gimenez, D; Ruscitti, M; Carbone, A; Andreau, R; Vasicek, A; Ronco, B; Martínez, S; Garbi, M. (2015). Cultivo en hidroponía. Coord. J Beltrano y J Gimenez. 1 ed. La Plata, Argentina. UNLP. 181 p.
- Bernuy, G. (2016). Asimilación de nitrógeno amoniacal bajo dos estrategias de adición de carbono en sistemas biofloc para cultivo de tilapias (*Oreochromis niloticus*). Tesis Ing. Pesquero. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 90 p.

- Bhujel, R. (2002). Manejo alimentario para tilapia (en línea). Revista Panorama Acuícola. 7(4). Disponible en: http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/especies/_archivos/000008-Tilapia/071201_Manejo%20Alimentario%20para%20Tilapia%20-%20Nutricion%20y%20bajo%20costo.php
- Cajo, A. (2016). Producción hidropónica de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa L*), bajo el sistema NFT, con tres soluciones nutritivas. Tesis Ing. Agr. Cevallos, Ecuador, Universidad Técnica de Ambato. 84 p.
- Caló, P. (2011). Introducción a la acuaponía. CENADAC. 15 p.
- Candarle, P. (s.f.) Técnicas de acuaponía. CENADAC. 47 p.
- Cantor, F. (2007). Manual de producción de tilapia. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla. Puebla, México. 140 p.
- Choudhary, H; Sharma, B; Uppadhyay, B; Sharma, S. (2017). Effect of different protein levels on growth and survival of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies.5 (3): 480-484.
- Connolly, K; Trebic, T. (2010). Optimization of a backyard aquaponic food production system. Faculty of Agricultural and Environmental Sciences Macdonald Campus - McGill University, US.
- CSR Servicios. (2008). Análisis Foliar Invierno 2008 (en línea). Úbeda, España. Consultado 31 mar. 2019. Disponible en http://www.csrservicios.es/NOTAS_INFORMATIVAS/DESCARGAS/LOS_ANALISIS_FOLIARES.pdf.

- Delaide, B. (2017). A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability. Doc. Thesis. Belgique, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech. 99 p.
- Diver, S. (2006). Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA.28 p.
- Eck, M; Körner, O; Haïssam M. (2019). Nutrient Cycling in Aquaponics Systems. In: Goddek, S; Joyce, A; Kotzen, B; Burnell, G. Aquaponics Food Production Systems. 231-246.
- El-Sayed, AF. (2006). Tilapia Culture. London, UK. CABI Publising. 278 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). (2007). Estado mundial de la acuicultura 2006. Roma. 147 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). (2016). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. Roma. 224 p.
- Favela, E; Preciado, P; Benavides, A. (2006). Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila. 146 p.
- Gallego-Alarcon, I; García-Pulido, D. (2017). Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador- columna de arena. Tecnología y Ciencias del Agua. 8(1): 83-95.
- Gamble, A. (1999). A comparative analysis of three biofilter types treating wastewater produced in recirculating aquaculture systems. MSc. Thesis. Virginia, United States, Virginia Polytechnic Institute and State University.67 p.

- Garbanzo, M. (2012). Deficiencias nutricionales en hidroponía (en línea). Universidad de Costa Rica, Costa Rica; 13 mar. Consultado 06 set. 2017. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2012/03/13/deficiencias-nutricionales-en-hidroponia.html>
- García-Ulloa, M; Hernández, F; Chávez, R. (2004). Evaluación de un sistema experimental de acuaponía. *Revista de investigación y difusión científica* nov. 2004.
- Garzón, S. (2006). Evaluación del rendimiento de tres variedades de lechuga bajo el sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) de hidroponía con dos soluciones de nutrientes. Tesis Lic. Ing. Agr. Zamorano, Honduras. Escuela Agrícola Panamericana. 25 p.
- Grande, EO; Luna, PR. (2010). Comparación de la producción de lechuga a 6, 12 y 18 plantas/m² con 40 y 70 mg.L-1 de nitrógeno total en acuaponía con tilapia. Tesis Lic. Ing. Agr. Zamorano, Honduras. Escuela Agrícola Panamericana. 23 p.
- Guerrero, E; Revelo, J; Benavides, O; Chaves, G; Moncayo, C. (2014). Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 31 (1): 3-16.
- Ingle de la Mora, G; Villareal, E; Arredondo, J.; Ponce, J.; Barriga, A. (2003). Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. *Hidrobiológica* 13(4): 247-253.
- Jacques, C; Hernández, J. 2005. Valoración productiva de lechuga con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*. 3(1):11-16.
- Jaramillo, J; Aguilar, P; Tamayo, P; Arguello, E; Guzmán, M. (2016). Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga bajo buenas prácticas agrícolas en el oriente antioqueño. CARPOICA. Medellín, Colombia. 147 p.

- Jones, J. (2014). Complete guide for growing plants hydroponically (en línea). CRC Press. 223 p. Consultado 09 set.2019. Disponible en <https://books.google.com.pe>
- Lara, A. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra*.17 (3): 221-229.
- La Rosa, O. (2015). Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) bajo condiciones del valle del Rímac, Lima. Tesis Ing. Agrónomo. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. p. 16-17.
- Licamele, J. (2009). Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. Ph. D. Thesis. Arizona, United States, The University of Arizona.172 p.
- Llanes, J; Toledo, J; Fernández, I; Lazo de la vega, JM. (2006). Nutrición y alimentación de tilapias. Asociación Cubana de Producción Animal. p. 51-54.
- Martínez, G; Lara, A; Padilla, L; Luna, M; Avelar, J; Llamas, J. (2015). Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. *Terra Latinoamericana*.33 (3): 251-260.
- Martínez, F; Garcés, G. (2010). Crecimiento y producción de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. romana) bajo diferentes niveles de potasio. *Revista Colombiana de ciencias hortícolas*. 4 (2): 185-198.
- Martinez-Porchas, M; Martinez-Cordova, LR. (2011). World aquaculture: environmental impacts and troubleshooting alternatives. *The Scientific Journal*. 2012:1-9.
- Marulanda, C. (2003). La huerta hidropónica popular. 3 ed. Santiago, CL. FAO. 131 p.

- Mendoza, V. (2015). Efecto de tres soluciones nutritivas en el rendimiento y calidad de *Lactuca sativa* L.var. capitata cv. *White Boston* en sistema hidropónico en Santiago de Chuco, La Libertad. Tesis Ing. Agr. Trujillo, Perú, Universidad Nacional de Trujillo. 59 p.
- Merlín, V; Martínez, R. (2015). Capacidad de absorción de nitratos de plantas acuáticas cultivadas en acuaponía. Jóvenes en la Ciencia Revista de Divulgación Científica.1 (2): 24-28.
- Meyer, D. (2004). Introducción a la Acuicultura. Escuela Agrícola Panamericana. Zamorano, HO. 159 p.
- Mollehuanca, E. (2019). Comparativo de dosis de soluciones nutritivas inorgánicas en el rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.var *White Boston*) mediante la técnica de cultivo acolchado plástico. Tesis Ing. Agrónomo. Cusco, Perú, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. p. 45-46.
- Moreno, E; Zafra, A. (2014). Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Biológicas. 34 (2): 60-72.
- Morgado, A. (2014). Balance de nutrimentos en un sistema acuapónico de tilapia-jitomate. Tesis Mag. Sc. Chapingo, México, Universidad Autónoma Chapingo. 68 p.
- Nozzi, V; Graber, A; Shmautz, Z; Mathis, A; Junge, R. (2018). Nutrient Management in Aquaponics: Comparison of three approaches for cultivating lettuce, mint and mushroom herb. Agronomy 2018. 8 (27):1-15.
- Panné, S; Luchini, L. (2012). Análisis económico para producción de tilapias. Incremento de actividad de acuicultura en las regiones, NEA, NOA y Centro. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina.

- Pérez, M; Téllez, R; Avelino, R; Tenorio, F. (2015). Sistema acuapónico. *Revista de Ciencias naturales y Agropecuarias*. 2 (4): 538-546.
- Poot, C; Novelo-Salazar, R; Hernández, M. (2009). Cultivo integral de la tilapia (en línea). Campeche, MX. Consultado 04 jul. 2017. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/55367067/20458321-ABC-en-El-Cultivo-Integral-de-La-Tilapia>
- Rakocy, J; Bailey, D.; Martin, J.; Shultz, R. (2000). Tilapia production systems for the Lesser Antilles and other resource-limited, tropical areas. In: *International Symposium on tilapia in Aquaculture*. 651-662 p.
- Rakocy, J. (2002). Acuiponía: Cultivo hidropónico de vegetales en sistemas de recirculación. In Timmons, M; Ebeling, J; Wheaton, F; Summerfelt, S; Vinci, B. *Sistemas de recirculación para la acuicultura (original en inglés)*. Chile, Fundación Chile. 617-653.
- Rakocy, J. (2005). *Oreochromis niloticus*, Programa de información de especies acuáticas (en línea). En: Departamento de Pesca y Acuicultura de la FAO. Roma. Consultado 15 oct. 2017. Disponible en: http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/es#tcNA00C5
- Rakocy, J; Masser, M; Losordo, T. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics – integrating fish and plant culture. *Southern Regional Aquaculture Center* (454).
- Ramírez, M. (1997). Efecto de diferentes fuentes de fósforo en el rendimiento y la calidad de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones semihidropónicas. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 161 p.

- Ramírez, D; Sabogal, D; Jiménez, P; Hurtado, H. (2009). Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico Golfish-Lechuga. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 5 (1): 154-170.
- Ramírez, D; Sabogal, D; Gómez, E; Rodríguez, D; Hurtado, H. (2008). La acuaponía: Una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 4 (1): 32-51.
- Regalado, J. (2013). Diseño y evaluación de un sistema acuapónico para la producción de animales acuáticos y plantas para consumo humano. Tesis Mag. Sc. Guanajuato, México, Universidad de Guanajuato. 101 p.
- Reyes-Flores, M; Sandoval-Villa, M; Rodríguez-Mendoza, N; Trejo-Téllez, L; Sánchez-Escudero; Ret-Mendiola, J. (2016). Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.(17):3529-3542.
- Rietra, R; Heinen, M; Dimkpa, C; Bindraban, Prem. (2017). Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communications in soil science and plant analysis*. 48(16): 1895-1950.
- Rojas, L; Muñoz, L; Soto, S; Arancibia, V; Ibacache, G; Pérez, K. (2016). Antecedentes técnicos y económicos sobre producción de hortalizas baby en cultivo sin suelo bajo las condiciones de la región de Atacama. *Boletín INIA* 342. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Intihuasi. La Serena, Chile.
- Saavedra, M. (2006). Manejo del Cultivo de Tilapia. Managua, NI.
- SAGARPA-CONAPESCA (Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación – Comisión Nacional de acuacultura y pesca). (2011). Guía empresarial para el cultivo, engorda y comercialización de la tilapia (mojarra). México. 116 p.

- Salinas, A. (2017). Determinación de la digestibilidad y energía digestible de la torta de sachá inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) cruda en paiche (*Arapaima gigas*). Tesis Ing. Zootecnista. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 61 p.
- Sánchez-Aldana, J. (2008). Caracterización del flujo de masa de un sistema cerrado, para el aprovechamiento de sus efluentes en hidroponía. Tesis Mag. Sc. Baja California, MX, Centro de Investigación Científica y de educación Superior de Ensenada.
- Sánchez, IA; Revelo, DM; Burbano, AE; García, R; Guerrero C. (2013). Eficiencia de consorcio microbiano para tratamiento de aguas residuales en un sistema de recirculación acuícola. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 11(1): 245-254.
- Sierra, A; Simonne, E; Treadwell, D. (2007). Principios y prácticas para el manejo de nutrientes en la producción de hortalizas. Cooperativa de la Florida, Instituto de alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de la Florida.
- Somerville, C; Cohen, M; Pantanella, E; Stankus, A; Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 589*. Rome, FAO. 262 p.
- Trasviña, A; Cervantes, M; Perez, E; Timmons, M. (2007). Sistema de recirculación modular para uso familiar/ multifamiliar. Veracruz, MX. 32 p.
- Torres-Novoa, D; Hurtado-Nery, V. (2012). Requerimientos nutricionales para Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Orinoquia*, 16 (1):63-68.
- Vega-Villasante, F; Cortés-Lara, M; Zúñiga-Medina, L; Jaime-Ceballos, B; Galindo-López, J; Basto-Rosales, M; Nolasco-Soria, H. (2010). Cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) a pequeña escala ¿Alternativa alimentaria para familias rurales y periurbanas de México? *REDVET (Revista Electrónica de Veterinaria)*. 11 (3).

Yavuzcan, H; Robaina, L; Pirhonen, J; Mente, E; Domínguez, D; Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with emphasis on feed and faeces-A review. *Water* 9 (13): 1-17.

Zamora, E. (2016). Algunas deficiencias nutricionales en cultivos protegidos. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

Zimmermann, S; Fitzsimmons, K. (2004). Tilapicultura intensiva en Tópicos Especiais em Piscicultura de Água Doce Tropical Intensiva. Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática. Tec Art, Sao Paulo, Brazil. p.239-266.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Componentes de la solución nutritiva concentrada La Molina

Solución Concentrada A (5 L, volumen final)	Pesos
Nitrato de potasio	550 g
Nitrato de amonio	350 g
Superfosfato triple	180 g
Solución Concentrada B (2L, volumen final)	
Sulfato de magnesio	220 g
Quelato de hierro	17 g
Solución micronutrientes	400 ml
Solución micronutrientes	
Sulfato de manganeso	5 g
Ácido bórico	3 g
Sulfato de zinc	1,7g
Sulfato de cobre	1 g
Molibdato de amonio	0,2 g

La preparación de la solución nutritiva se agrega 5 ml de la solución concentrada A y 2 ml de la solución concentrada B en un litro de agua. Para mayor volumen se aplica la misma relación.

Anexo 2: Método volumétrico para determinar alcalinidad total

1. Tomar volúmenes de muestra adecuada (25, 50, 100 ml) en un matraz erlenmeyer.
2. Añadir dos gotas de fenoftaleína, si la muestra permanece incolora, proceder con el paso 4.
3. Si la muestra se torna rosada, titular con ácido sulfúrico 0.02N hasta conseguir la decoloración registrar el gasto como valor A
4. Añadir a la misma muestra tres gotas del indicar mixto verde de bromocresol-rojo de metilo, si la muestra se torna rosada el gasto será 0 y si queda verde azulada titular hasta obtener coloración rosada que indicará un pH 4.6, anotar el gasto total, como valor B incluyendo el valor A.

$$\text{Alcalinidad total como mg.L-1 de CaCO}_3 = \frac{\text{Valor B} \times \text{N} \times 50000}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

B: ml de gasto total en la titulación

N: normalidad del ácido titulante

Anexo 3: Sistema acuapónico de la investigación



Anexo 4: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro temperatura en el tanque de peces.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_TP_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.
1	The distribution of Temperatura_TP_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.
1	The distribution of Temperatura_TP_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E3	-102.768	11.348	-9.056	.000	.000
E1-E2	-127.230	11.545	-11.020	.000	.000
E3-E2	24.462	11.451	2.136	.033	.098

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E3	-115.344	11.509	-10.022	.000	.000
E1-E2	-134.448	11.608	-11.583	.000	.000
E3-E2	19.103	11.608	1.646	.100	.299

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E3	-106.048	11.451	-9.261	.000	.000
E1-E2	-134.956	11.546	-11.689	.000	.000
E3-E2	28.908	11.348	2.547	.011	.033

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 5: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro temperatura a la salida del biofiltro.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_SB_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_SB_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_SB_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E2	-114.749	11.608	-9.886	.000	.000
E1-E3	-140.617	11.509	-12.218	.000	.000
E2-E3	-25.868	11.608	-2.229	.026	.078

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E2	-113.339	11.513	-9.845	.000	.000
E1-E3	-128.976	11.319	-11.394	.000	.000
E2-E3	-15.637	11.319	-1.381	.167	.501

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E2	-119.614	11.546	-10.360	.000	.000
E1-E3	-130.753	11.451	-11.419	.000	.000
E2-E3	-11.139	11.348	-.982	.326	.979

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 6: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro temperatura a la salida de la cama acuapónica.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_SCA_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_SCA_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Temperatura_SCA_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E2	-110.025	11.607	-9.479	.000	.000
E1-E3	-150.128	11.508	-13.046	.000	.000
E2-E3	-40.103	11.607	-3.455	.001	.002

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E2	-111.607	11.511	-9.695	.000	.000
E1-E3	-133.067	11.318	-11.757	.000	.000
E2-E3	-21.460	11.318	-1.896	.058	.174

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E1-E2	-118.894	11.545	-10.298	.000	.000
E1-E3	-129.394	11.450	-11.301	.000	.000
E2-E3	-10.501	11.347	-.925	.355	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 7: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro oxígeno disuelto en el tanque de peces.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_TP_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.092	Retain the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_TP_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_TP_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E2	34.385	11.321	3.037	.002	.007
E3-E1	52.230	11.321	4.614	.000	.000
E2-E1	17.845	11.514	1.550	.121	.364

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-64.691	11.349	-5.700	.000	.000
E2-E1	67.099	11.547	5.811	.000	.000
E3-E1	2.408	11.452	.210	.833	1.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 8: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro oxígeno disuelto en la salida del biofiltro.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_SB_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_SB_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_SB_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-41.178	11.528	-3.572	.000	.001
E2-E1	111.928	11.528	9.709	.000	.000
E3-E1	70.750	10.952	6.460	.000	.000

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-43.288	11.321	-3.824	.000	.000
E2-E1	101.762	11.514	8.838	.000	.000
E3-E1	58.474	11.321	5.165	.000	.000

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-63.802	11.349	-5.622	.000	.000
E2-E1	107.426	11.547	9.303	.000	.000
E3-E1	43.623	11.452	3.809	.000	.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 9: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro oxígeno disuelto en la salida de la cama acuapónica.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_SCA_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_SCA_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Oxígeno_SCA_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-52.861	11.526	-4.586	.000	.000
E2-E1	105.967	11.526	9.193	.000	.000
E3-E1	53.106	10.909	4.868	.000	.000

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-50.390	11.321	-4.451	.000	.000
E2-E1	99.619	11.514	8.652	.000	.000
E3-E1	49.229	11.321	4.349	.000	.000

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E3	-64.518	11.349	-5.685	.000	.000
E2-E1	108.606	11.547	9.406	.000	.000
E3-E1	44.088	11.452	3.850	.000	.000

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 10: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro pH en el tanque de los peces.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_TP_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_TP_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_TP_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E1	20.893	11.478	1.820	.069	.206
E3-E2	61.813	11.478	5.385	.000	.000
E1-E2	-40.920	11.575	-3.535	.000	.001

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E1	12.716	11.413	1.114	.265	.796
E3-E2	84.443	11.313	7.464	.000	.000
E1-E2	-71.726	11.413	-6.284	.000	.000

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E1	32.618	11.451	2.849	.004	.013
E3-E2	54.540	11.348	4.806	.000	.000
E1-E2	-21.922	11.546	-1.899	.058	.173

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 11: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro pH en la salida del biofiltro.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_SB_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_SB_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_SB_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.000	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E1	35.811	11.477	3.120	.002	.005
E3-E2	58.242	11.477	5.075	.000	.000
E1-E2	-22.431	11.573	-1.938	.053	.158

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E1	24.648	11.412	2.160	.031	.092
E3-E2	62.747	11.311	5.547	.000	.000
E1-E2	-38.099	11.412	-3.339	.001	.003

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E3-E1	44.952	11.450	3.926	.000	.000
E3-E2	75.132	11.347	6.621	.000	.000
E1-E2	-30.180	11.545	-2.614	.009	.027

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same. Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is .05.

Anexo 12: Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro pH en la salida de la cama acuapónica.

Hypothesis Test Summary

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_SCA_9 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.001	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_SCA_12 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.006	Reject the null hypothesis.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of pH_SCA_3 is the same across categories of Etapas.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.170	Retain the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Each node shows the sample average rank of Etapas.

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E1	19.316	11.574	1.669	.095	.285
E2-E3	-41.394	11.477	-3.607	.000	.001
E1-E3	-22.078	11.477	-1.924	.054	.163

Sample1-Sample2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj.Sig.
E2-E1	9.660	11.411	.847	.397	1.000
E2-E3	-35.241	11.310	-3.116	.002	.006
E1-E3	-25.582	11.411	-2.242	.025	.075