

Leticia Félix Cuencas

Flujo de nitrógeno y fósforo bajo tres etapas productivas de *O. niloticus* en un sistema acuapónico hiperintensivo con *S. lycopersicum*

2021



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Flujo de nitrógeno y fósforo bajo tres etapas productivas de
Oreochromis niloticus en un sistema acuapónico hiperintensivo
con *Solanum lycopersicum*

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de
Doctor en Ingeniería de Biosistemas

Presenta

M. en GIC. Leticia Félix Cuencas

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Querétaro, Qro., 2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Ingeniería de Biosistemas

FLUJO DE NITRÓGENO Y FÓSFORO BAJO TRES ETAPAS PRODUCTIVAS DE
OREOCHROMIS NILOTICUS EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO HIPERINTENSIVO
CON SOLANUM LYCOPERSICUM

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Doctorado en Ingeniería de Biosistemas

Presenta:

M. en GIC. Leticia Félix Cuencas

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Dr. Juan Fernando García Trejo

Presidente

Firma

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Secretario

Firma

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa

Vocal

Firma

Dr. Ramón G. Guevara González

Suplente

Firma

Dra. Ana Angélica Feregrino Pérez

Suplente

Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre, 2021

RESUMEN

La constante demanda de alimentos, sumada a la preocupación por la explotación del entorno, ha propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías para generar sistemas de producción de alimentos que usen de manera eficiente los recursos. En este sentido, uno de los sistemas de producción que maximiza el uso del agua y los nutrientes, mitigando los daños al medio ambiente, es la acuaponía. Sin embargo, existe una carencia de datos cuantitativos sobre el flujo de los nutrientes a partir de las distintas etapas productivas del pez. Por lo antes señalado, la presente investigación llevó a cabo un análisis del flujo de nitrógeno y fósforo en tres etapas productivas de tilapia, en un sistema acuapónico hiperintensivo con jitomate. Para ello, en primera instancia se llevó a cabo una investigación sistemática que determinó la capacidad máxima de densidad de población del cultivo de tilapia; posteriormente se evaluó el flujo de nutrientes, y así, determinar la eficiencia nutricional para la producción vegetal, así como el rendimiento del sistema. Se determinó como densidad máxima de población la biomasa de 80 kg/m³ de tilapia para cada etapa productiva, siendo las crías las que aportan la mayor cantidad de nitrógeno y fósforo por gramo de pez. La dinámica de los nutrientes fue similar en crías y juveniles, con el mayor porcentaje de nitrógeno y fósforo en el agua (47.27 y 43.93% de N; 41.35 y 38.39 % de P), derivado de la excreción de los peces; estos nutrientes fueron asimilados por la planta para la producción de frutos (5.9 y 5.96 kg/m²), sin la adición de fertilizantes químicos. Por otro lado, los adultos no excretaron la suficiente cantidad de nutrientes (35.89% de N; 32.15 % de P), lo que repercutió en una nula producción vegetal; sin embargo, en esta etapa se obtuvo carne aprovechable (78.98 kg/m³) con muy buena calidad (35.33% de proteína en filete). Los resultados obtenidos proporcionan información sobre la

integración de los sistemas acuapónicos, resaltando el empleo del agua residual de las etapas de cría y juvenil para obtener un uso eficiente de los recursos.

Palabras clave: Flujo de nutrientes, sistema acuapónico, hiperintensivo, etapas productivas.

SUMMARY

The constant demand for food, along with the concern for the exploitation of the environment, has led to the development of new technologies to generate food production systems that uses efficiently the resources. In this sense, one of the production systems that maximizes the use of water and nutrients, mitigating damage to the environment, is aquaponic. However, there is a lack of quantitative data on the flow of nutrients from the different productive stages of fish. Due to the aforementioned, present investigation carried out an analysis of the flow of nitrogen and phosphorus in three productive stages of tilapia, in a hyperintensive aquaponic system with tomato. For this, a systematic investigation was carried out that determined the maximum capacity of population density of tilapia culture, to later evaluate the flow of nutrients; based on the data it was determined the nutritional efficiency for plant production as well as the performance of system. The biomass of 80 kg/m³ of tilapia for each productive stage was determined as maximum population density, with the fingerlings being the ones that provide the highest amount of nitrogen and phosphorus per gram of fish. The dynamics of nutrients was similar in fingerlings and juveniles, with the highest percentage of nitrogen and phosphorus in the water (47.27 and 43.93% of N; 41.35 and 38.39% of P), derived from the excretion of fish; these nutrients were assimilated by the plant for the production of fruits (5.9 and 5.96 kg/m²) without the addition of chemical fertilizers. On the other hand, the adults did not excrete a sufficient amount of nutrients (35.89% of N; 32.15% of P), which resulted in zero plant production. However, in this stage usable

meat was obtained (78.98 kg/m³) with very good quality (35.33% protein in fillet). The results obtained provide information on the integration of aquaponic systems, highlighting the use of wastewater from the fingerlings and juvenile stages to obtain an efficient use of resources.

Key words: Nutrient flow, aquaponic system, hyperintensive, productive stages.

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi familia, quienes me han brindado su acompañamiento durante este proceso, especialmente a mis hijas Ana Paula y Fernanda, quienes son mi mayor motivación y orgullo. A Jesús y mis padres Jesús y Martha Evelia, de quienes siempre recibí su apoyo y confianza de manera incondicional. Los amo y les dedico este proyecto de vida.

Dirección General de Bibliotecas UFG

AGRADECIMIENTOS

Por su gran enseñanza, apoyo, confianza y por permitirme formar parte de su grupo de estudiantes, agradezco a mi maestro, amigo y director de tesis Dr. Juan Fernando García Trejo. Agradezco también todo el apoyo y enseñanzas brindadas al sínodo (Dra. Claudia, Dra. Geli, Dr. Ramón y Dr. Genaro), quienes son un gran ejemplo a seguir.

A todos mis compañeros y amigos de generación y de laboratorio por su gran apoyo en el desarrollo del presente proyecto, muchas gracias. De manera muy especial y con gran cariño a mis compañeros Samuel y Josafat por todos los aprendizajes y vivencias, no pude haber tenido mejores compañeros de trabajo, gracias!

Agradezco a mi familia y amigos, quienes me motivaron y ayudaron durante todo el proceso.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo para continuar con mi formación.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por seguirme brindando formación académica de gran calidad.

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
DEDICATORIAS.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1.1 <i>Acuaponia.....</i>	5
2.1.1.1 Acuicultura.....	6
2.1.1.2 Hidroponia.....	13
2.1.1.3 Organismo acuático (Tilapia).....	16
2.1.1.4 Organismo vegetal (jitomate).....	22
2.1.1.5 Importancia de los nutrientes en los sistemas productivos (nitrógeno y fósforo).....	26
2.2 ESTUDIOS RECIENTES EN ACUAPONIA.....	29
3. HIPÓTESIS.....	32
4. OBJETIVOS.....	32
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	32
4.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	32
5. METODOLOGÍA.....	33
5.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	34
5.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE POBLACIÓN, EN EL CULTIVO DE LA TILAPIA, PARA ESTABLECER LA CAPACIDAD MÁXIMA DE CARGA DEL SISTEMA HIPERINTENSIVO.....	35

5.2.1	<i>Diseño experimental</i>	35
5.2.2	<i>Descripción del sistema</i>	36
5.2.3	<i>Condiciones ambientales</i>	39
5.2.4	<i>VARIABLES DE RESPUESTA</i>	39
5.2.5	<i>Determinaciones químicas</i>	41
	• Nitrógeno amoniacal (NH ₃ -N).....	42
	• Nitritos (NO ₂ ⁻).....	42
	• Nitratos (NO ₃ ⁻).....	43
5.2.6	<i>Composición bromatológica</i>	43
5.3	CUANTIFICACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN TILAPIA DURANTE EL CICLO PRODUCTIVO DEL PEZ, EN UN CULTIVO ACUÍCOLA HIPERINTENSIVO.....	46
5.3.1	<i>Diseño experimental</i>	46
5.3.2	<i>Descripción del sistema</i>	47
5.3.3	<i>Condiciones ambientales</i>	49
5.3.4	<i>Determinaciones químicas (contenido de nutrientes)</i>	49
5.3.5	<i>Determinación del metabolismo aeróbico</i>	50
5.3.6	<i>VARIABLES DE RESPUESTA DEL CULTIVO DE TILAPIA (ESTIMADORES DE CRECIMIENTO)</i>	51
5.4	EVALUACIÓN DE UN CULTIVO ACUAPÓNICO EN TRES ETAPAS PRODUCTIVAS DE TILAPIA CON JITOMATE.....	52
5.4.1	<i>Diseño experimental</i>	52
5.4.2	<i>Descripción del sistema</i>	54
5.4.2.1	Sistema acuícola.....	55
5.4.2.2	Sistema hidropónico.....	58
5.4.3	<i>Condiciones ambientales (calidad del agua)</i>	59
5.4.4	<i>VARIABLES DE RESPUESTA</i>	59
5.4.5	<i>Determinaciones químicas</i>	60
5.4.6	<i>Determinaciones bromatológicas</i>	61
5.4.6.1	Jitomate.....	61
5.4.6.2	Filete de tilapia.....	62

5.5	DETERMINACIÓN DE LA DINÁMICA DE NUTRIENTES (NITRÓGENO Y FÓSFORO) EN TRES ETAPAS PRODUCTIVAS DE LA TILAPIA EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO CON JITOMATE, PARA ESTABLECER LA EFICIENCIA ENTRE AMBOS SISTEMAS.	64
5.5.1	<i>Eficiencia en el uso de nitrógeno y fósforo</i>	64
5.5.2	<i>Estimación del balance de masa de nitrógeno y fósforo</i>	65
5.6	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA ACUAPÓNICO EN TRES ETAPAS PRODUCTIVAS DE TILAPIA, A TRAVÉS DEL FLUJO DE NUTRIENTES.	66
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
6.1	DENSIDAD DE POBLACIÓN EN EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA DE TILAPIA (<i>OREOCHROMIS NILOTICUS</i>).....	68
6.1.1	<i>Condiciones ambientales (control de calidad del agua)</i>	69
6.1.2	<i>Estimadores de crecimiento</i>	75
6.1.3	<i>Composición bromatológica</i>	78
6.2	CUANTIFICACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN TILAPIA DURANTE EL CICLO DE VIDA DEL PEZ, EN UN CULTIVO ACUÍCOLA HIPERINTENSIVO, PARA DETERMINAR EL FLUJO DE NUTRIENTES.	81
6.2.1	<i>Condiciones ambientales</i>	81
6.2.2	<i>Análisis del contenido de nutrientes.</i>	81
6.2.3	<i>Análisis del metabolismo</i>	90
6.2.4	<i>Estimadores de crecimiento</i>	91
6.3	EVALUACIÓN DEL CULTIVO ACUAPÓNICO ENTRE TILAPIA Y JITOMATE.	96
6.3.1	<i>Control de calidad del agua</i>	96
6.3.2	<i>Crecimiento</i>	105
6.3.3	<i>Calidad del filete de tilapia</i>	110
6.3.4	<i>Crecimiento de tomate</i>	111
6.4	DINÁMICA DE NUTRIENTES (NITRÓGENO Y FÓSFORO) EN DIFERENTES ETAPAS DE PRODUCCIÓN DE TILAPIA Y JITOMATE EN ACUAPONIA, PARA ESTABLECER LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN.	117
6.4.1	<i>Nitrógeno</i>	117
6.4.2	<i>Fósforo</i>	122
6.5	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA	125

7. CONCLUSIÓN	132
8. REFERENCIAS	133

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un sistema acuapónico simple (FAO, 2014).	6
Figura 2. Clasificación de la acuicultura (FAO, 2016).	7
Figura 3. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2020).	9
Figura 4. Utilización y consumo aparente de pescado a nivel mundial (FAO, 2018).	9
Figura 5. Producción acuícola en México, 1980-2015 (FAO, 2016).....	10
Figura 6. Contribución del pescado al suministro de proteínas animales, promedio del periodo 2015-2017 (FAO, 2020).	11
Figura 7. Esquema metodológico para obtener el flujo de nutrientes en un sistema acuapónico hiperintensivo de tilapia-jitomate.	33
Figura 8. Poblado de Amazcala, municipio de El Marqués, estado de Querétaro (Google Maps, 2018).	34
Figura 9. Instalación en los estanques del sistema de recirculación acuícola.	37
Figura 10. Distribución de tratamientos en el sistema de recirculación acuícola por tratamientos de densidad y temperaturas.....	38
Figura 11. Distribución de tratamientos en un sistema de recirculación acuícola de tilapia: A) crías, B) juveniles y C) adultos.....	48
Figura 12. Distribución de tratamientos en sistemas de recirculación acuícola de cultivo de tilapia: A) juveniles, B) crías, C) adultos, y D) cultivo hidropónico.	55

Figura 13. Diagrama del alimentador automatizado para los peces en el cultivo..	57
Figura 14. Diagrama conceptual del flujo de nitrógeno y fósforo en el sistema acuapónico.....	65
Figura 15. Sistema de recirculación acuícola con tres densidades de población y dos temperaturas para cada densidad.....	69
Figura 16. Comportamiento de la temperatura del agua, durante 60 días, en un sistema de recirculación acuícola con y sin control de temperatura.	70
Figura 17. Comportamiento del pH dentro de los tanques durante 60 días en un sistema de recirculación acuícola.	71
Figura 18. Comportamiento del oxígeno disuelto en el agua dentro de los tanques durante 60 días en un sistema de recirculación acuícola.	72
Figura 19. Tendencia de concentración de compuestos de nitrógeno (NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₃ -N) durante cinco días en tratamientos de temperatura en tres densidades durante el experimento.	74
Figura 20. Gráfico de la concentración de NO ₂ -N por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> durante 24 horas.	85
Figura 21. Gráfico de la concentración de NH ₄ ⁺ por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> durante 24 horas.	86
Figura 22. Gráfico de la concentración de PO ₄ por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> durante 24 horas.	86
Figura 23. Gráfico de la concentración de NO ₃ -N por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> durante 24 horas.	87

Figura 24. Gráfico del promedio de la concentración de nitritos (NO ₂ -N) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> , durante 60 días.	87
Figura 25. Gráfico del promedio de la concentración de nitratos (NO ₃ -N) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> , durante 60 días.	88
Figura 26. Gráfico del promedio de la concentración de fosfatos (PO ₄) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> , durante 60 días.	89
Figura 27. Gráfico del promedio de la concentración de amonio (NH ₄ ⁺) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> , durante 60 días.	89
Figura 28. Relación O:N en tres etapas productivas de <i>Oreochromis niloticus</i>	91
Figura 29. Gráfico de la relación talla-peso en crías de <i>O. niloticus</i> bajo un sistema hiperintensivo de recirculación acuícola.	95
Figura 30. Gráfico de la relación talla-peso en juveniles de <i>O. niloticus</i> bajo un sistema hiperintensivo de recirculación acuícola.	95
Figura 31. Gráfico de la relación talla-peso en adulto de <i>O. niloticus</i> bajo un sistema hiperintensivo de recirculación acuícola.	96
Figura 32. Comportamiento de la temperatura del agua en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto).	97

Figura 33. Comportamiento de la temperatura del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.	98
Figura 34. Comportamiento del pH del agua en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto). .	100
Figura 35. Comportamiento del pH del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.	100
Figura 36. Comportamiento del oxígeno disuelto en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto). .	101
Figura 37. Comportamiento del oxígeno disuelto del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.	102
Figura 38. Comportamiento de la conductividad eléctrica del agua en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto).	103
Figura 39. Comportamiento de la conductividad eléctrica del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.	104
Figura 40. Gráfica del crecimiento en juveniles de tilapia en un sistema acuapónico hiperintensivo.	108

Figura 41. Gráfica del crecimiento en crías de tilapia en un sistema acuapónico hiperintensivo.....	108
Figura 42. Gráfica del crecimiento en adultos de tilapia en un sistema acuapónico hiperintensivo.....	108
Figura 43. Relación de longitud-peso de crías de <i>O. niloticus</i> en un sistema acuapónico hiperintensivo.	109
Figura 44. Relación de longitud-peso de juveniles de <i>O. niloticus</i> en un sistema acuapónico hiperintensivo.	109
Figura 45. Relación de longitud-peso de adultos de <i>O. niloticus</i> en un sistema acuapónico hiperintensivo.	110
Figura 46. Crecimiento (cm) de jitomate (<i>S. lycopersicum</i>) en un cultivo acuapónico con agua residual de crías, juveniles y adultos de tilapia, y un cultivo hidropónico con solución nutritiva.	112
Figura 47. Flujo de nitrógeno en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre crías de tilapia y jitomate.	118
Figura 48. Flujo de nitrógeno en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre juveniles de tilapia y jitomate.	118
Figura 49. Flujo de nitrógeno en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre adultos de tilapia y jitomate.	119
Figura 50. Balance del nitrógeno en el sistema acuapónico en diferentes tratamientos de etapas productivas del pez.....	121
Figura 51. Flujo de fósforo en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre crías de tilapia y jitomate.	122

Figura 52. Flujo de fósforo en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre juveniles de tilapia y jitomate.	123
Figura 53. Flujo de fósforo en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre adultos de tilapia y jitomate.	123
Figura 54. Balance del fósforo en el sistema acuapónico en diferentes tratamientos de etapas productivas del pez.	124
Figura 55. Desviación del mayor crecimiento de la tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) en tres estados productivos bajo un cultivo de recirculación acuapónico.	130
Figura 56. Desviación del mayor crecimiento de la producción de jitomate hidropónico con agua proveniente de crías y juveniles de tilapia, y cultivo con solución nutritiva estándar.	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos de densidades de población y temperaturas en el sistema de recirculación acuícola de tilapia.	35
Tabla 2. Características de alimento suministrado a los peces.	39
Tabla 3. Niveles de nutrientes en el medio aceptables para el cultivo de tilapia en sistemas de recirculación acuícola.	41
Tabla 4. Tratamientos de diferentes etapas de desarrollo de <i>Oreochromis niloticus</i> en un sistema de recirculación acuícola.	47
Tabla 5. Características del alimento suministrado a los peces.	49
Tabla 6. Tabla de composición de nutrientes (ppm) de la solución nutritiva Peters profesional hydroponic special fertilizer 5-11-26.	53
Tabla 7. Biomasa de cultivo de la tilapia en las diferentes etapas de desarrollo (tratamientos).....	56
Tabla 8. Esquema de alimentación por etapa de desarrollo de <i>Oreochromis niloticus</i>	57
Tabla 9. Estimadores de crecimiento de <i>O. niloticus</i> para 6 tratamientos de densidad de población y temperatura durante 60 días (media \pm DE).....	76
Tabla 10. Resultados del análisis bromatológico de <i>O. niloticus</i> para 6 tratamientos de densidad y temperatura de población durante 60 días (medios \pm DS)	79
Tabla 11. Concentración total de nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fósforo) presente en tres etapas productivas bajo un cultivo hiperintensivo de tilapia.	82

Tabla 12. Concentración de nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fósforo) por gramo de pez presente en tres etapas productivas bajo un cultivo hiperintensivo de tilapia.	83
Tabla 13. Estimadores del crecimiento para tres etapas productivas de <i>Oreochromis niloticus</i> en un cultivo hiperintensivo (media \pm DE).....	93
Tabla 14. Monitoreo de las condiciones físicas del agua en los estanques de recirculación acuícola del cultivo de tilapia en tres etapas reproductivas y reservorios para riego al cultivo de jitomate en los diferentes tratamientos.....	105
Tabla 15. Estimadores de crecimiento para tres etapas productivas de <i>Oreochromis niloticus</i> en un sistema acuapónico hiperintensivo.	106
Tabla 16. Estimadores del análisis bromatológico para <i>Oreochromis niloticus</i> en tres etapas de desarrollo (cría, juvenil y adulto) en un cultivo acuapónico hiperintensivo.	111
Tabla 17. Estimadores de crecimiento para jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i>) regados con agua residual de tres estados productivos de tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) en un sistema acuapónico hiperintensivo.	112
Tabla 18. Factores de crecimiento y cosecha de jitomate cultivado en sistema hidropónico y acuapónico con agua residual acuícola de tilapia en tres etapas de producción.	114
Tabla 19. Estimadores de calidad para jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i>) regados con agua residual de tres estados productivos de tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) en un sistema acuapónico hiperintensivo.	116
Tabla 20. Cuadro comparativo de tasa específica de crecimiento en tilapia en tres etapas productivas de cultivos acuapónicos.	127

Tabla 21. Estimadores de producción y rendimiento de tilapia (*O. niloticus*) y jitomate (*S. lycopersicum*) en el cultivo acuapónico.....129

Dirección General de Bibliotecas UAQ

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el mundo se está enfrentando a grandes cambios, los cuales están directamente relacionados con una alta demanda de energía, comida y agua; estas circunstancias impactan directamente en la escasez de agua, combustibles fósiles y alimento, así como en la degradación del suelo (FAO, 2018). Con la finalidad de enfrentar estos cambios, los sistemas de producción sustentable de alimentos, cuyos procesos requieren menos consumo de agua y energía, han tomado mayor relevancia. Por tal motivo, investigadores de todo el mundo se han enfocado en la generación de alimentos que permitan la optimización en el uso de los recursos naturales; para ello se han propuesto y evaluado alternativas tecnológicas que además aporten beneficios sociales (FAO, 2014), como es la acuaponía que es el objeto abordado en la presente investigación.

La acuaponía es un sistema potencial de producción sostenible de alimentos que integra la acuicultura con la hidroponía, en la que el efluente rico en nutrientes de la producción de peces se utiliza para el crecimiento de las plantas (Wongkiew *et al.*, 2017). Con respecto a la acuicultura, dentro de los enfoques basados en la agricultura para la seguridad alimentaria y la nutrición, el pescado ocupa un lugar importante por su valor nutricional y su incidencia en las dietas, debido a que representa más del 20% de la ingesta promedio *per cápita* de proteínas animales de la población mundial (FAO, 2020). No obstante, uno de los principales problemas que tienen los sistemas de producción acuícola son las descargas de aguas residuales, las cuales están cargadas de nutrimentos que al ser desechados, generan contaminación en los ambientes acuáticos naturales (Junge *et al.*, 2017).

Por otro lado, los sistemas tradicionales de producción vegetal ya no son suficientes para abastecer las necesidades alimenticias de la población; por ello, se están desarrollando nuevas tecnologías con el objetivo de aumentar el rendimiento por unidad de superficie y la calidad de los productos (Baixauli y Aguilar, 2002), que adicionalmente permitan tener alto rendimiento, calidad e inocuidad de los

productos obtenidos. Por ello, la agricultura protegida está siendo cada vez más usada para producir hortalizas de alto valor a escala mundial; siendo la hidroponía una de las principales tecnologías que comprende la agricultura protegida más comunes. Sin embargo, la hidroponía depende de la suplementación de fertilizantes químicos, los cuales son generalmente costosos (Gómez *et al.*, 2019).

En este contexto, y con la finalidad de hacer más eficientes los sistemas de producción de peces (acuícolas) y vegetales (hidropónicos), así como contrarrestar los efectos negativos de cada una de estas prácticas, surgen avances tecnológicos como la acuaponía (Yavuzcan *et al.*, 2017). La acuaponía se ha destacado por ser una alternativa atractiva para solucionar el principal problema de los acuicultores de cómo deshacerse del agua sobrecargada de nutrientes, que genera la contaminación de ambientes acuáticos; así como el principal problema de los agricultores de conseguir nutrientes económicos para el crecimiento vegetal, el cual se obtendría del agua residual de los peces (Nelson, 2008). Este tipo de sistemas se consideran una respuesta a la necesidad de ahorro de agua y la disminución en el uso de agroquímicos para la producción de alimentos, así como la búsqueda de sistemas productivos que generen menor contaminación al ambiente.

Como se pudo observar, los nutrientes son uno de los elementos básicos para el funcionamiento de los sistemas acuapónicos. Entre los principales nutrientes requeridos por las plantas para su desarrollo se encuentran el nitrógeno y el fósforo, los cuales son desechados por los peces en cultivo, y representan los principales contaminantes de sus aguas residuales (Cao *et al.*, 2020). Estos elementos químicos son sales solubles en agua, considerados en agricultura como los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal (Hawkesford *et al.*, 2012) y comúnmente utilizados en fertilizantes. Es por lo antes mencionado, que el índice de nitrógeno y fósforo (NP) es considerado como un buen indicador para estimar el

flujo de masas y la retención que se presenta dentro de un sistema productivo (Ennabili *et al.*, 1998; Cerozi y Fitzsimmons, 2017).

La producción simultánea de peces y plantas, en sistemas acuapónicos, es posible dado que los requerimientos alimenticios del sistema para el crecimiento de peces son muy similares a los requerimientos alimentarios necesarios para el cultivo de plantas (Timmons, 2002). Es por ello que la comprensión del flujo de nutrientes es imprescindible para adaptar adecuadamente los insumos a las tasas de extracción, que varían a lo largo del ciclo de producción. El desarrollo de criterios de diseño para sistemas acuapónicos requiere estimaciones de la absorción de nutrientes y una comprensión más profunda de la dinámica de los mismos (Rakocy y Hargreaves, 1993; Endut *et al.*, 2016; Moustafa *et al.*, 2020). Debido a lo anterior, los cálculos del balance de nutrientes son ampliamente utilizados para aumentar su eficiencia y reducir las pérdidas en los sistemas agrícolas (Cerozi y Fitzsimmons, 2017).

Por otro lado, uno de los principales problemas que enfrenta la acuaponía es el poco conocimiento de la ruta que siguen los nutrientes a través del sistema. Los estudios sobre balance de energía hasta ahora se han centrado sobre aspectos ambientales, dejando de lado sistemas productivos a gran escala, en los que se ha determinado el funcionamiento, pero poco se ha estudiado el balance y flujo de materia y energía que ocurre entre plantas y animales (Love *et al.*, 2015).

La mejora en la eficiencia en los sistemas acuapónicos requiere de un conocimiento detallado del ciclo de nutrientes en el sistema. Es indispensable la comprensión de la distribución de los nutrientes en las diferentes partes del proceso en el sistema con la finalidad de lograr una correcta administración de los mismos; para ello, se requiere del conocimiento de las cantidades, es decir, su cuantificación en cada una de las partes, lo que permitirá identificar el destino y la distribución de los nutrientes suministrados en la entrada y así poder hacer más eficiente,

económica y ecológicamente, el sistema. El nitrógeno y el fósforo son elementos claves debido a que son esenciales para la nutrición animal y vegetal, e indispensables para el control de la contaminación ambiental que se genera con el desecho de estas prácticas de producción. Por lo anterior, la comprensión cuantitativa de la distribución del nitrógeno y el fósforo es muy importante para lograr la reducción de los desechos, así como eliminar la dependencia de fertilizantes químicos. Es por lo antes mencionado, que en el presente trabajo se llevó a cabo la caracterización del flujo de nitrógeno y fósforo en diferentes etapas productivas de tilapia, en un sistema acuapónico hiperintensivo tilapia-jitomate, con la finalidad de establecer las mejores condiciones de crecimiento, para mejorar el rendimiento del sistema.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Acuaponia.

La acuaponia es conocida como uno de los sistemas de producción agrícola más eficientes; este sistema se desarrolló como un método de alta productividad comparada con los sistemas de producción de plantas y peces por sí solos (Yang y Kim, 2020). Un sistema acuapónico consiste en dos unidades de recirculación independientes que son conectadas unidireccionalmente; esto permite el uso de aguas residuales de los peces como fuente de nutrientes para las plantas en hidroponia y su optimización para el crecimiento vegetal (Suhl *et al.*, 2016).

La acuaponia, como un proceso simbiótico en donde se integran la hidroponia y la acuicultura, es una tecnología de producción sustentable de alimentos (Pineda-Pineda *et al.*, 2020). Esta tecnología ha recibido gran atención debido a la capacidad del sistema para cultivar peces a alta densidad, mantener la calidad adecuada del agua y minimizar su recambio, así como por generar una producción rentable de vegetales, los cuales son los responsables de la asimilación directa de los desechos disueltos de los peces (Danaher *et al.*, 2013).

La acuaponía incluye la interacción dinámica entre peces, plantas, bacterias y su ambiente acuático (Figura 1. Esquema de un sistema acuapónico simple (FAO, 2014). Los peces y las plantas dependen de nutrientes, solutos y la calidad del agua; por lo que, sólo teniendo un balance entre estos productos, se puede tener una cosecha saludable de peces y vegetales (Filep *et al.*, 2016).

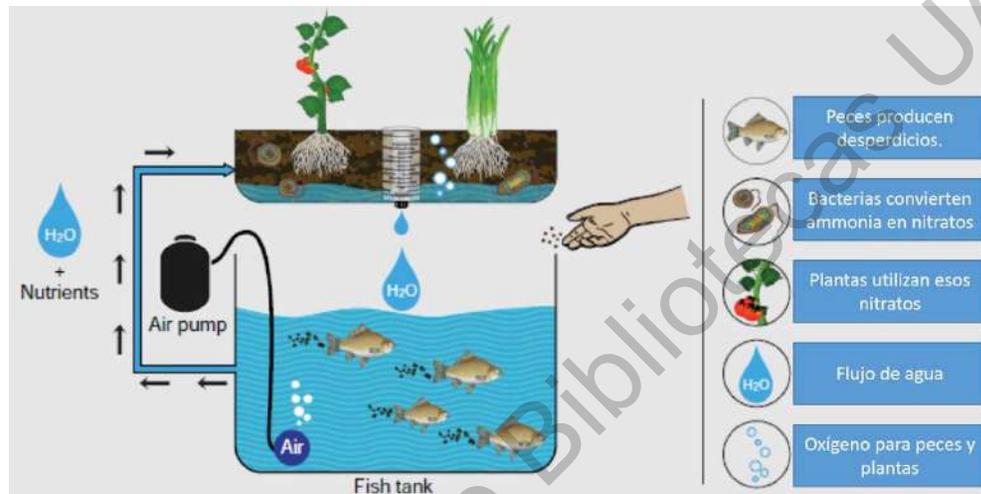


Figura 1. Esquema de un sistema acuapónico simple (FAO, 2014).

2.1.1.1 Acuicultura.

La acuicultura es la cría de organismos acuáticos, comprendidos peces, moluscos, crustáceos y plantas. La Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables define a la acuicultura como el conjunto de actividades dirigidas a la reproducción controlada, preengorda y engorda de especies de fauna y flora, realizadas en instalaciones ubicadas en aguas dulces, marinas o salobres, por medio de técnicas de cría o cultivo, que sean susceptibles de explotación comercial, ornamental o recreativa (Suhl *et al.*, 2016). La acuicultura se clasifica de acuerdo al hábitat de la especie cultivada, la técnica de cultivo, la especie cultivada o el grado

de intensidad (Figura 2) (FAO, 2016).

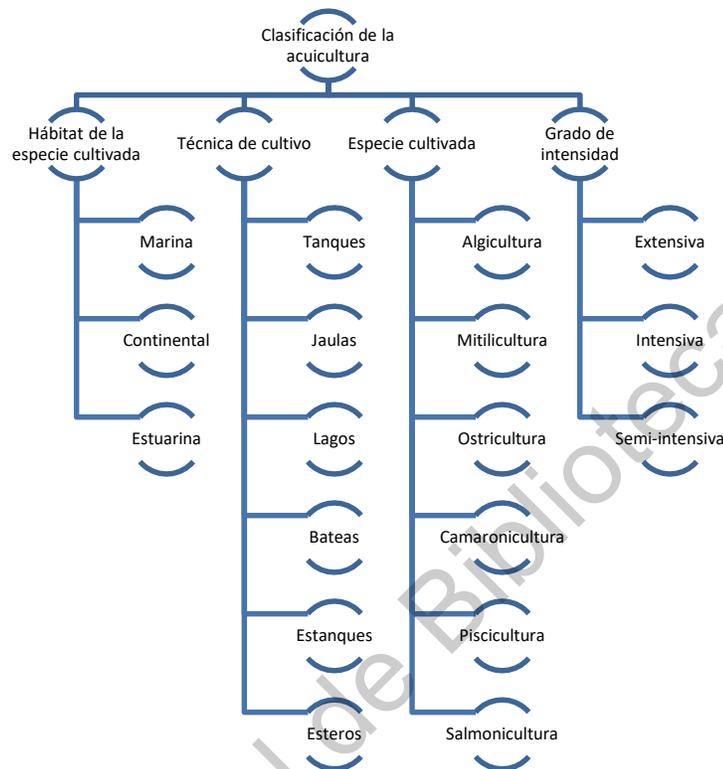


Figura 2. Clasificación de la acuicultura (FAO, 2016).

La producción mundial de peces comestibles cultivados se apoya cada vez más en la acuicultura continental, que suele practicarse en un entorno de agua dulce en la mayoría de países. En 2018, la acuicultura continental produjo 51.3 millones de toneladas de animales acuáticos, lo que equivale al 62.5% de la producción mundial de pescado comestible cultivado, frente al 57.9% alcanzado en 2000 (FAO, 2020). La piscicultura (cultivo de peces) sigue predominando en la acuicultura continental, y representa el 92.5% (47.5 millones de toneladas) del total de la producción procedente de este tipo de acuicultura (FAO, 2018).

Para el 2018 se han registrado en la producción mundial 622 especies que han sido cultivadas alguna vez en el mundo (FAO, 2020). A pesar de la gran diversidad de las especies cultivadas, la producción de la acuicultura por volumen está dominada por un reducido número de especies a escala nacional, regional y mundial. La cría de peces de aleta, que constituye el subsector más diverso, se apoyaba en 27 especies; éstas representaron el 90% de la producción total de peces de aleta para el 2018, de los cuales las 20 especies más importantes representaron el 83.6% de la producción total. La tilapia es la tercera especie más cultivada a nivel mundial en cuanto a peces de aleta se refiere, alcanzando una producción de 4.557 ton en el 2016 (FAO, 2018).

Con respecto a la situación actual de la acuicultura, esta actividad ha sido la desencadenante del crecimiento continuo del suministro de pescado para el consumo humano (Figura 3). Entre 1961 y 2016, el aumento anual medio del consumo mundial de pescado comestible (3.2%) superó al crecimiento de la población (1.6%) (Figura 4). En términos *per cápita*, el consumo de pescado comestible aumentó de 9 kg en 1961 a 20.2 kg en 2015, a una tasa media de aproximadamente un 1.5% al año. En 2015, el pescado representó alrededor del 17% de la proteína animal consumida por la población mundial. Además, el pescado proporcionó casi un 20% del aporte medio de proteínas animales *per cápita* a unos 3,200 millones de personas (FAO, 2018).

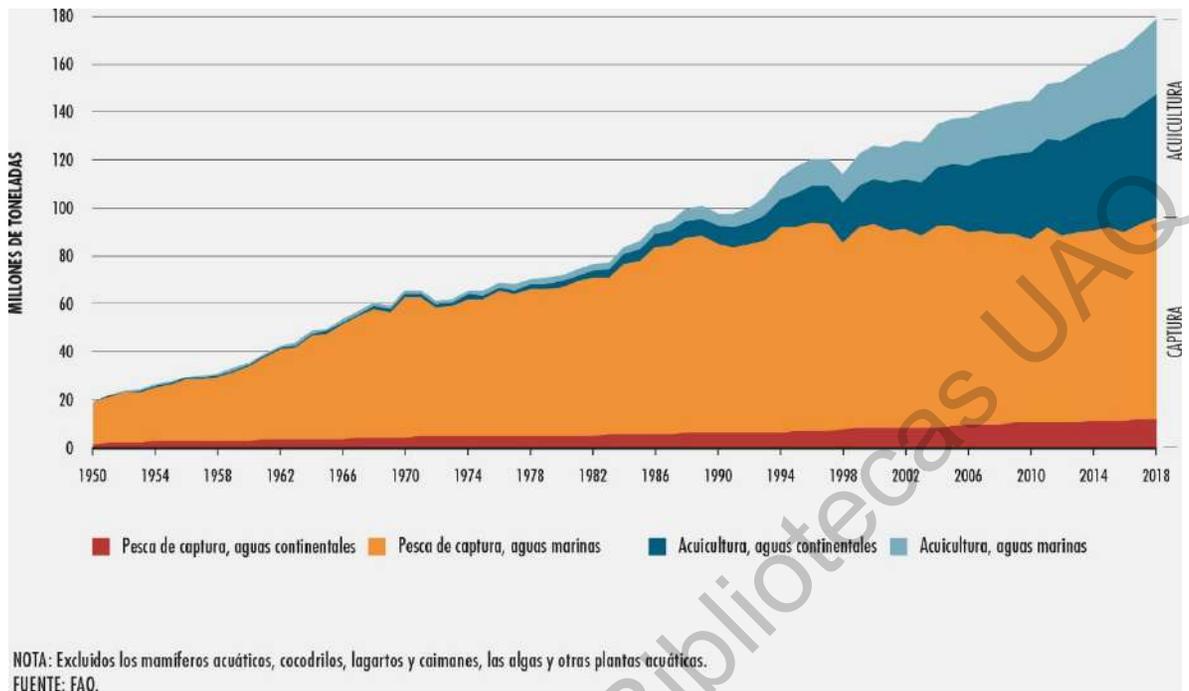


Figura 3. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2020).

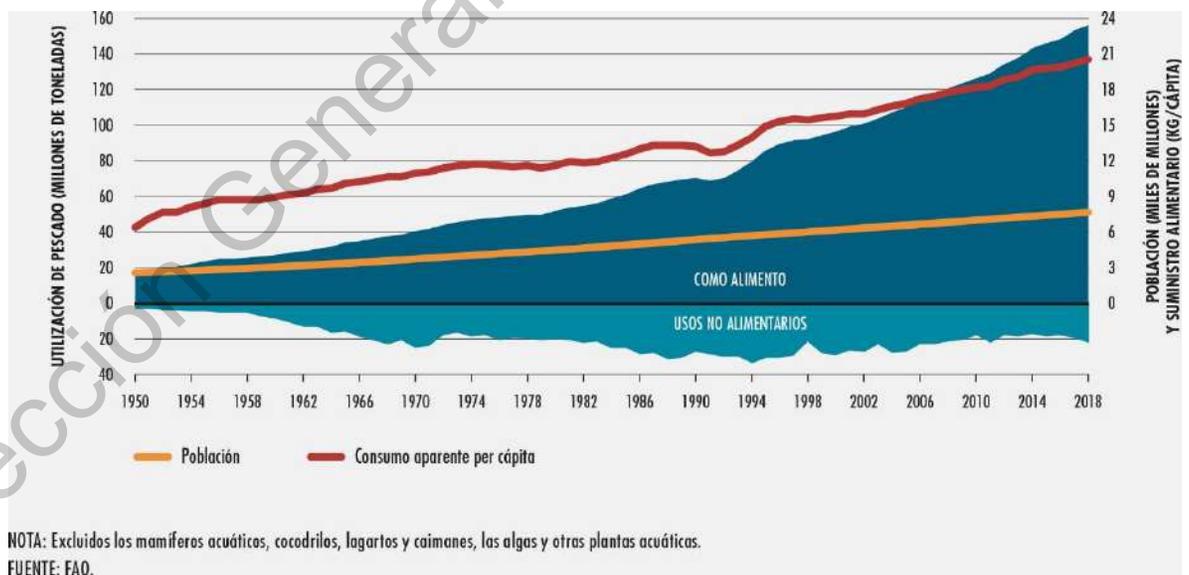


Figura 4. Utilización y consumo aparente de pescado a nivel mundial (FAO, 2018).

A nivel nacional, la acuicultura es una de las actividades con mayor potencial y desarrollo en los últimos años (Figura 5), la cual arroja beneficios sociales y económicos que se traducen en una fuente de alimentación para la población con un elevado valor nutricional y costos accesibles; sin embargo, aproximadamente el 80% de los cultivos que se desarrollan en el país son de tipo extensivo y con rendimiento bajo (Álvarez *et al.*, 2012).

Producción de acuicultura a total en los Estados Unidos Mexicanos (toneladas)
Fuente: FAO FishStat



Figura 5. Producción acuícola en México, 1980-2015 (FAO, 2016).

De acuerdo a lo reportado por la FAO y la OMS, la importancia de este tipo de cultivos para la producción de pez radica en que el pescado desempeña un papel fundamental en la nutrición y la seguridad alimentaria mundial; lo anterior dado que representa una fuente valiosa de macro y micronutrientes sumamente importantes para obtener dietas diversificadas y saludables. Cantidades reducidas de pescado pueden proporcionar aminoácidos, grasas y micronutrientes esenciales, como el hierro, el yodo, la vitamina D y el calcio, que suelen estar ausentes en las dietas a base de hortalizas.

La contribución del pescado a la dieta es importante en lo que respecta a las proteínas animales de alta calidad y fácil digestión. Una porción de 150 g de pescado proporciona entre un 50% y un 60% de las necesidades proteínicas diarias de un adulto. En 2017, el pescado representó alrededor del 17% de la proteína animal, y el 7% de todas las proteínas consumidas por la población mundial. Además, proporcionó casi un 20% del aporte de proteínas animales *per cápita* a cerca de 3,200 millones de personas de todo el mundo (Figura 6) (FAO, 2020). El pescado también proporciona minerales esenciales, como calcio, fósforo, zinc, hierro, selenio y yodo, así como vitaminas A, D y B y, por ende, ayuda a reducir los riesgos de malnutrición y enfermedades (Allison *et al.*, 2013).

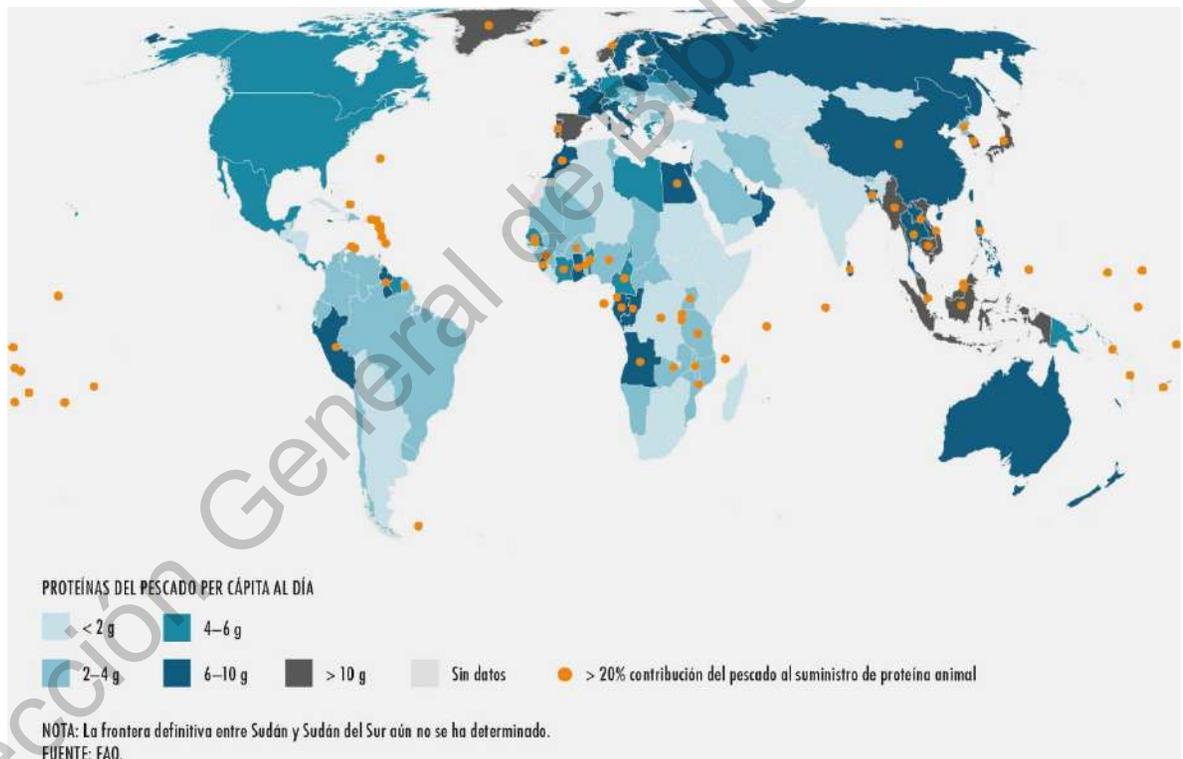


Figura 6. Contribución del pescado al suministro de proteínas animales, promedio del periodo 2015-2017 (FAO, 2020).

Debido a los avances científicos y tecnológicos en la acuicultura ha habido un crecimiento en esta práctica, suministrando más de la mitad del pescado para consumo humano en el mundo (Cai y Zhou, 2019); sin embargo, el crecimiento de la acuicultura ha registrado efectos no deseados a nivel local, regional y mundial. Entre los efectos perjudiciales más comunes, y que limitan el desarrollo de la acuicultura, se encuentran conflictos sociales entre la tierra y el uso de los recursos (principalmente agua), destrucción de importantes servicios ecosistémicos, uso de productos químicos y medicamentos veterinarios perjudiciales, el efecto de las fugas en las poblaciones de peces naturales, la producción ineficiente o insostenible de harina de pescado y aceite de pescado (FAO, 2020). Adicionalmente, ha sido motivo de preocupación la introducción y la propagación de enfermedades de los animales acuáticos, la producción limitada, los conflictos sociales, el acceso restringido a los servicios posteriores a la cosecha, los riesgos por financiación y la falta de resiliencia a la variabilidad climática y otras amenazas y desastres (Banco Mundial, 2015).

La acuicultura es uno de los sectores productivos con mayor tasa de crecimiento; sin embargo, por la gran demanda, se requieren de sistemas de producción más intensivos. Estos sistemas presentan inconvenientes por la densidad del cultivo, la biomasa total, la tasa de alimentación, la calidad y manejo de agua. Lo antes señalado influye en la asimilación de nutrientes por los peces y la generación de aguas residuales altamente contaminantes (Rafiee y Sadd, 2005; Suhl, *et al.*, 2016).

Entre las tecnologías que surgen para resolver el tema de las aguas residuales de los cultivos acuícolas destacan los sistemas de recirculación acuícolas (RAS). Estos sistemas usan aproximadamente 90% menos agua que los sistemas convencionales, por lo que la liberación de nutrientes al ambiente también se ve reducida (Timmons *et al.*, 2009; Verdegem, 2013). Sin embargo, aunque los

sistemas de recirculación acuícolas reducen la demanda de agua, se sigue requiriendo de este recurso y las aguas residuales están sobrecargadas de nutrientes, que, al ser descargadas en los ecosistemas, provoca eutrofización y otros problemas ambientales (Verdegem, 2013).

2.1.1.2 Hidroponía.

A nivel mundial, el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector agropecuario tiene como objetivo fundamental aumentar el rendimiento por unidad de superficie y la calidad de los productos. El reto es generar tecnologías de producción que se adecuen a las condiciones actuales de las diferentes regiones, y que sean factibles de ser llevadas a la práctica por la mayoría de los productores (Baixauli y Aguilar, 2002).

Por el alto rendimiento, calidad e inocuidad de los productos que se obtienen, la agricultura protegida está siendo usada cada vez más para producir hortalizas de alto valor a escala mundial; al respecto, entre las principales tecnologías destacan los invernaderos y la hidroponía. En conjunto, ambas permiten un alto grado de control y manejo de los factores limitantes de la producción (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014).

Con respecto a la hidroponía, ésta permite el cultivo de plantas en un medio libre de suelo (Resh and Howard 2012), cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídrico-nutricionales, a través del agua y una solución nutritiva (SN), con o sin el uso de un medio o sustrato (arena, grava, vermiculita, lana de roca, etc.) (Beltrano y Giménez, 2015). Es esencial que la solución nutritiva tenga la proporción (en aniones y cationes) necesaria para que las plantas absorban los nutrimentos (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014). El uso de sistemas hidropónicos para la producción de hortalizas en invernadero es ideal, pues tiene un alto grado de eficiencia en el uso del agua por la disminución de

percolación y evaporación; además, el volumen del sistema radical es más reducido y los nutrimentos más accesibles. Los rendimientos de la hidroponía por unidad de área cultivada son altos debido a una mayor densidad del cultivo, mayor productividad por planta y la eficiencia en el uso de los recursos agua, luz y nutrientes (Beltrano y Giménez, 2015).

Los sistemas hidropónicos han sido clasificados como abiertos, donde el exceso de la SN que drena no es reusado y es dirigido al suelo y a las aguas subterráneas; y sistemas cerrados, donde la SN excedente es recuperada, regenerada y reciclada en un sistema de recirculación cíclico (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014). Los sistemas donde no hay recirculación de la SN (abiertos) a menudo han sido vistos como derrochadores de nutrientes, debido al exceso que drena como desecho, lo que trae como consecuencia una elevación de costos y contaminación del suelo y aguas subterráneas (Pardossi *et al.*, 2011). En los sistemas hidropónicos cerrados es más eficiente el uso del agua y los nutrimentos que se aplican para el crecimiento y desarrollo de un cultivo; sin embargo, un aspecto que limita la reutilización de la SN, y con ésto la eficiencia en el uso del agua y de los nutrimentos, es la obtención de un rendimiento menor, disminución de la calidad, acumulación de toxinas (fitotoxicidad), deficiencias minerales y el riesgo de diseminación de microorganismos que causan enfermedad en la raíz del cultivo.

A nivel mundial, el mercado hidropónico global superó los 21,203.5 millones de dólares en 2016. Por tipo de cultivo, el mercado hidropónico global incluye tomate, cucurbitáceas, lechuga, hortalizas de hoja y pimientos, entre otros. El tomate forma el segmento de mercado más grande, y representó el 30.4% del mercado global en 2018. A medida que los consumidores se están volviendo cada vez más conscientes de la superioridad de la calidad hortalizas cultivadas en hidroponía, la demanda de este tipo de cultivos está aumentando en Europa y Asia-

Pacífico. Europa es tradicionalmente el mercado más grande que está implementando técnicas avanzadas en hidroponía.

Uno de los propósitos de la agricultura sin suelo, o hidroponía, es que permite reducir las plagas y otras enfermedades propias del suelo. Debido a que se tiene el control del sustrato inerte utilizado para un cultivo hidropónico, este sustrato puede ser esterilizado y, por lo tanto, reutilizado entre cultivos; lo anterior da cumplimiento a una de las demandas de la producción intensiva del aprovechamiento de los recursos. Otra de las ventajas del cultivo sin suelo es que la disponibilidad de nutrientes en las raíces de las plantas se puede manipular y controlar, lo que genera mayor producción; además de que se requiere menor cantidad de agua, debido a que ésta se puede recircular y, por lo tanto, reciclar. Aunado a lo anterior, el rendimiento en un sistema hidropónico es mayor que en la agricultura tradicional, debido a las condiciones controladas que se tienen. Al no necesitar suelo para este tipo de actividad, la hidroponía se convierte en un método de cultivo indispensable en zonas en donde no hay tierra cultivable disponible; de esta manera puede obtenerse alta productividad en poco espacio, por lo que se vuelve una práctica importante para la seguridad alimentaria a nivel mundial (FAO, 2014²).

A pesar de las ventajas antes descritas, la hidroponía presenta algunos inconvenientes, entre los que destacan un costo inicial alto, así como conocimiento de fisiología y nutrición del vegetal a producir, ya que un desbalance nutricional causa efecto inmediato en el cultivo y el agua utilizada debe ser de buena calidad (Gilsanz, 2007).

Aunque la hidroponía podría rendir hasta 11 veces más por unidad de área que la agricultura convencional en suelo, su producción está basada en gran medida en fertilizantes químicos que incluyen al nitrógeno (N) y al fósforo (P) (Yang y Kim, 2020); es por ello, que una preocupación importante de la hidroponía es su dependencia a los fertilizantes químicos, los cuales son costosos y pueden ser

difíciles de obtener. A pesar de que la hidroponia es más eficiente en el uso de agua y nutrientes que la agricultura tradicional, su gestión es más complicada, sobretodo en cuanto a la instalación se refiere, además de que se requiere de electricidad para circular u oxigenar el agua. Es importante considerar que la inversión inicial es una limitante de esta práctica, por el control y manejo de las condiciones que se debe tener (FAO, 2014²).

Por otro lado, este tipo de cultivos demandan una mayor especialización del productor, exigiéndole un grado mayor de conocimientos respecto al funcionamiento del sistema y de la nutrición del mismo. Repentinos cambios de temperatura o de ventilación tendrán respuesta directa en el cultivo, sobre todo en ambientes protegidos, por lo que se requiere de gente con conocimientos que regulen las necesidades del sistema de producción (Gilsanz, 2007).

A pesar de ser considerada una de las tendencias de producción agrícolas con mayores beneficios, la hidroponia requiere de gran capacidad de control para cubrir con las necesidades de agua y nutrientes de las plantas cultivadas, lo que genera amplios gastos. Por lo antes mencionado, se requieren de alternativas que minimicen los costos generados por el suplemento de nutrientes, así como estrategias para un mayor aprovechamiento del agua (Sharma *et al.*, 2018).

2.1.1.3 Organismo acuático (*Tilapia*).

Generalidades

La tilapia es un pez de agua dulce que pertenece a la familia Cichlidae. De manera natural se encuentra en cuerpos de agua africanos, el río Nilo, algunas zonas de Israel, Palestina y Siria; sin embargo, se introdujeron en países de clima tropical durante la segunda mitad del siglo XX (Pillay, 1990). La introducción de esta especie fue para cría como alimento, pesca recreativa, control de malezas e

investigación, entre otros. Es ampliamente utilizada debido principalmente a que es una especie que posee atributos que la convierten en candidata ideal para la acuicultura; entre ellas destacan su rápido crecimiento, tolerancia a condiciones ambientales diversas (temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto), resistencia al estrés y enfermedades, capacidad para reproducirse en cautiverio y aceptación de alimentos balanceados (El-Sayed, 2020).

En la última década se ha tenido un aumento del 70% en la producción de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), lo que ha afectado positivamente a la acuicultura continental a nivel mundial (FAO, 2020). Con respecto a los últimos reportes de la FAO, en el 2018 la tilapia del Nilo fue la tercera especie más cultivada, y como resultado de esta gran producción ha aumentado la tasa del consumo *per cápita* de esta especie en los últimos años. El cultivo de la tilapia en aguas continentales alcanzó 4,858,927 toneladas en 2017, representando el 82.6% de la producción total. A su vez, el valor económico también ha ido aumentando, de aproximadamente 239 millones de dólares en 1986 a 11,031.1 millones de dólares en 2017; es así que, el valor de la tilapia del Nilo representó entre el 65 y 70% del valor total en el mercado del cultivo de la tilapia durante las últimas décadas (FAO, 2020).

La tilapia actualmente desempeña un importante papel como alimento para consumo humano. De acuerdo a la FAO 2020, el cultivo de tilapia en México tiene un futuro prometedor por la disponibilidad de recursos de agua dulce y las condiciones ambientales adecuadas que favorecen su cultivo; por lo anterior, es muy probable que México se convierta en un importante productor de tilapia en un futuro próximo.

A pesar de las ventajas y del gran aumento que ha tenido el cultivo de la tilapia existen limitaciones que pueden restringir el desarrollo de su producción; entre ellas destacan el conocimiento inadecuado sobre la especie, la falta de fondos

económicos y asistencia técnica para su cultivo, alimentos de baja calidad y aumento económico en los insumos del cultivo (El-Sayed, 2020). Además, recientemente se detectó que la tasa de crecimiento de los peces y el cambio en su alimentación y metabolismo pueden dar como resultado proporciones variables de macronutrientes durante el ciclo de producción acuícola (Jia *et al.*, 2017). Por ello es importante el conocimiento en las diferentes etapas de desarrollo de los peces, las cuales se describen a continuación:

- Alevín: Es la etapa del desarrollo subsecuente al embrión y a la eclosión, dura alrededor de 3 a 5 días; en esta fase, el alevín se caracteriza porque presenta un tamaño de 0.5 a 1 cm y posee un saco vitelino en el vientre de donde se alimentan los primeros días de nacidos. Posteriormente a esta etapa, se les consideran crías.
- Cría: Se les llama crías cuando los peces han absorbido el saco vitelino y comienzan a aceptar alimento balanceado, y han alcanzado una talla de 1 a 5 cm de longitud.
- Juvenil: son peces con una talla que varía entre 5 y 10 cm, la cual alcanzan a los dos meses de edad, y aceptan alimento balanceado para el crecimiento.
- Adulto: es la última etapa del desarrollo, los individuos presentan tallas entre 10 y 18 cm y pesos de 70 a 100 g, características que obtienen alrededor de los 3.5 meses de edad.

Condiciones de cultivo.

La demanda del cultivo de la tilapia del Nilo ha aumentado debido a su proteína de alta calidad; por lo que se ha buscado aumentar la producción incrementando las densidades de población de los cultivos (Telli *et al.*, 2014). Por ello, esta especie

es cultivada generalmente en sistemas semi-intensivos o intensivos. Debido a las densidades altas del cultivo, las condiciones del agua se convierten en un factor clave para obtener cultivos exitosos, por lo que es indispensable la comprensión de los principales parámetros de la calidad del agua de cultivo que pudieran afectar el crecimiento y la salud de los organismos (Sun *et al.*, 1992). Entre las principales condiciones ambientales que se deben considerar para el éxito en su cultivo están la temperatura, el oxígeno disuelto, pH y los compuestos nitrogenados presentes en el agua.

La temperatura es uno de los factores más importantes que afectan la fisiología, crecimiento, reproducción y metabolismo de la tilapia. La tilapia es una especie termófila y, por lo tanto, tolerante a un amplio intervalo de temperatura (20-35°C); no obstante, se han llevado a cabo investigaciones para conocer la temperatura óptima para su crecimiento y producción, reportando un rango óptimo de entre 25 y 30°C (El-Sayed y Kawanna, 2008; Xie *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2018).

El oxígeno disuelto (OD) es otro de los factores ambientales limitantes que afectan el crecimiento, sobrevivencia, alimentación y metabolismo de los peces. Aunque la tilapia puede tolerar niveles bajos de OD, cuando esto ocurre el rendimiento de la producción baja; lo anterior limita el crecimiento e incrementa las tasas de mortalidad, principalmente cuando se quieren manejar cultivos con altas densidades de población (El-Sayed, 2006). Ebeling *et al.* (2006) reportan un nivel óptimo de 5 mg/L, pudiendo vivir bien en un rango de 3-4 mg/L. Por otro lado, Abdel-Tawwab *et al.* (2014) encontraron que el crecimiento del pez, la asimilación del alimento y la composición de proteínas y lípidos, así como la respuesta inmune, reducen cuando decrece el oxígeno de 6.5 a 1.5 mg/L. Tran-Ngoc *et al.* (2016) reportaron que la proteína, cenizas y carbohidratos fueron más altos en normoxia (100% saturación de oxígeno 6.9 mg L⁻¹) que en hipoxia (50% saturación, 3.5 mg L⁻¹). Ross y Ross (1983) indican que la tasa de respiración de los peces aumenta

exponencialmente con el aumento del peso corporal.

Por otro lado, la importancia de mantener un pH adecuado para los peces se debe a que la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en el agua afecta las respuestas de supervivencia, crecimiento y reproducción (White *et al.*, 2013). Niveles altos de H^+ pueden causar toxicidad y pérdidas iónicas en las células branquiales (Baldisserotto *et al.*, 2014). Se han llevado a cabo estudios relacionados con la tolerancia de esta especie a diferentes concentraciones de pH en el agua del cultivo. Por ejemplo, Chakraborty and Banerjee (2010) reportaron un rango óptimo permisible de pH de 6.5 a 11, mientras que El-Sayed (2006) reportó un intervalo de 6.5 a 9 como óptimo para la mayoría de las especies acuáticas, dato que coincide con Lima *et al.* (2016). Por otro lado, Wangead *et al.* (1988) estudiaron los efectos del agua ácida sobre la supervivencia, el comportamiento y el crecimiento de alevines y adultos de tilapia; ellos encontraron que los adultos son más resistentes a concentraciones bajas de pH, pero ambos tienen su mejor crecimiento entre 5 y 7. Rebouças *et al.* (2016) reportaron un rango óptimo de pH en el agua de cultivo de *O. niloticus* entre 5.5 y 9. Aunado a lo anterior, El-Sayed (2020) menciona que el pH del agua bajo o alto puede conducir a cambios de comportamiento, daño de las células epiteliales branquiales, reducción de la eficiencia de la excreción de nitrógeno y aumento de la mortalidad. Al respecto, Chen y Liao (2004) reportaron que *O. mossambicus* expuesto a pH alto durante 7 días presentaba disminución de la excreción de nitrógeno amoniacal junto con un aumento de la excreción de urea; esta situación se revirtió a pH bajo (es decir, aumento de la excreción de amoníaco y disminución de excreción de urea).

Adicional a la importancia de los factores físicos en un cultivo acuícola, es importante el monitoreo de las condiciones químicas, principalmente las formas nitrogenadas. Existen tres formas nitrogenadas en el agua de un cultivo acuícola que pueden afectar la producción: amoníaco, nitratos y nitritos. En los sistemas de

acuicultura intensiva, el amoníaco metabolizado y excretado por los peces es el segundo factor limitante para aumentar los niveles de producción después del oxígeno disuelto (Ebeling *et al.*, 2006). Los desechos de nitrógeno presentes en el agua se generan cuando los peces digieren y metabolizan su alimento; estos desechos se liberan de tres maneras. Primero, el amoníaco se difunde en el agua de las branquias; si los niveles de amoníaco son altos en el agua circundante, el amoníaco no se difunde tan fácilmente, lo que puede conducir a la acumulación de amoníaco en la sangre y daños a los órganos internos. En segundo lugar, los peces producen grandes cantidades de orina muy diluida que se expulsa a través de sus respiraderos. Por último, algo de nitrógeno (proteínas, aminoácidos, amoníaco) también está presente en los desechos sólidos que se expulsan a través de la ventilación (FAO, 2014). La importancia del monitoreo de estos productos nitrogenados desechados es debido a que son tóxicos para los peces en cultivo, y pueden provocar reducción de apetito, disminución en la tasa de crecimiento e incluso la muerte a altas concentraciones (Nazar *et al.*, 2013).

El amoníaco se encuentra en dos formas: forma no ionizada NH_3 y forma ionizada NH_4^+ , siendo la primera la más tóxica para los peces. Estas dos formas de amoníaco coexisten en el agua y la proporción depende del pH y la temperatura del agua (Svobodova *et al.*, 2017). La acumulación de amoníaco en el agua de cultivo provoca la disminución de la tasa de crecimiento, la eficiencia alimentaria y la capacidad de sobrevivencia de los animales cultivados (Taheri Mirghaed *et al.*, 2019). El nitrito y nitrato son compuestos de transformación del nitrógeno mediante la oxidación del nitrógeno amoniacal total a través de un proceso llamado nitrificación (Hu *et al.*, 2015). El nitrito es el resultado de la oxidación del amoníaco mediante la actividad de bacterias oxidantes de amoníaco (Yun *et al.*, 2019); al respecto, las altas concentraciones en el agua son tóxicas para los peces, ya que impiden que la hemoglobina cumpla su función como acarreadora de oxígeno (García-Trejo, 2016), además de que afecta la salud del sistema inmunológico, el

metabolismo fisiológico y la regulación endócrina (Xie *et al.*, 2019). El nitrato se obtiene de la oxidación del nitrito mediante bacterias nitrificantes; este compuesto nitrogenado es el menos tóxico para los peces. Sin embargo, a muy altas concentraciones pueden reducir la capacidad de la hemoglobina para unirse al oxígeno y ser transportado por el cuerpo, disminuye la maduración reproductiva y puede provocar daño tisular (Yang *et al.*, 2019)

2.1.1.4 Organismo vegetal (jitomate).

Generalidades.

Solanum lycopersicum, conocido comúnmente como tomate o jitomate, es una especie de planta herbácea del género *Solanum* de la familia Solanaceae. El origen de esta especie se ubica en la región Andina, desde el sur de Colombia hasta el norte de Chile. Es una planta dicotiledónea (Cestoni *et al.*, 2006) y herbácea perenne, que se cultiva en forma anual para el consumo de sus frutos (Semillaria, 2015). Es la hortaliza más difundida en todo el mundo y la de mayor valor económico. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio. Tanto la producción como el consumo mundial del jitomate han registrado tendencia al alza durante la última década; los rendimientos varían en función de las tecnologías empleadas, tanto en el cultivo en campo abierto, como en la producción en invernaderos altamente tecnificados con sistemas automatizados (FIRA, 2019).

En México, la producción de tomate rojo creció a una tasa promedio anual de 3.6% entre 2007 y 2017, para ubicarse en un máximo histórico de 3.47 millones de toneladas. En ese periodo, la superficie cultivada en campo abierto se redujo a una tasa promedio anual de 5.9%, al pasar de 64,663 a 35,175 hectáreas, mientras que la superficie establecida con agricultura protegida (malla sombra e invernadero) pasó de 1,973 a 15,198 hectáreas; es decir, creció a una tasa promedio anual de

22.7%. Así, la producción obtenida con el uso de estas últimas tecnologías pasó de 0.9% del total en 2003 a 32.2% en 2010, y hasta 63.3% del volumen total en 2017 (FIRA, 2019).

El jitomate y sus productos derivados tienen un valor nutricional muy importante, además de ser antioxidantes, poseen actividad antiinflamatoria y anticancerígena (Bahare *et al.*, 2019). El fruto del jitomate es una fuente importante de vitamina C, potasio, ácido fólico y carotenoides, como el licopeno (Perveen *et al.*, 2015). El fruto de jitomate representa una fuente de fibra, potasio, fósforo, vitamina C, B y E y compuestos fenólicos (Ripoll *et al.*, 2016). La amplia disponibilidad de este fruto, el buen sabor, los precios accesibles y los beneficios para la salud son características únicas que convierten al jitomate en una verdura altamente demandada (Bahare *et al.*, 2019).

La fenología está determinada por la variedad y las condiciones climatológicas de la zona donde se establece el cultivo (Haifa Chemicals, 2014). Las etapas se pueden dividir en cinco periodos: germinación y crecimiento temprano con hojas iniciales (entre 25 y 35 días), periodo vegetativo (20 a 25 días), floración (20 a 30 días), fructificación temprana (20 a 30 días) y fructificación madura (15 a 20 días). Los días de cada etapa dependen de la variedad del cultivo, así como de factores ambientales como la temperatura, luz, condiciones del suelo y nutrientes (Jones, 2013).

Condiciones de cultivo.

Entre los requerimientos climáticos de la planta de jitomate destacan que le favorece el clima caliente, pues a más altas temperaturas, mayor será la velocidad de crecimiento. Sin embargo, bajo condiciones de baja luminosidad las temperaturas diurnas y nocturnas se deben mantener bajas, de lo contrario se tendrán plantas débiles con floración raquílica, debido a que la energía

proporcionada por la fotosíntesis será inadecuada para la velocidad de crecimiento (León, 2001). Las etapas de germinación, crecimiento, floración y fructificación se dan mejor bajo un ritmo alternante de temperatura entre el día y la noche que a una temperatura constante. La temperatura óptima debe oscilar entre los 20 y 30 °C durante el día, y los 13-18 °C durante la noche (Mercado-Luna y Rico-García, 2008).

Las temperaturas clave en el cultivo del jitomate son: en la etapa de germinación la mínima es de 10 °C, la máxima de 35 °C y la óptima varía entre 25 y 29 °C. En la etapa de desarrollo, la temperatura diurna debe estar entre 18 y 23 °C, la nocturna entre 16 y 18 °C, mientras que la temperatura de las raíces debe mantenerse entre 22 a 25 °C (León, 2001).

La planta de jitomate es exigente en cuanto a radiación solar; cuando ésta se desarrolla en épocas o condiciones de baja irradiación, el ciclo vegetativo se prolonga significativamente, la planta se alarga y el tallo es delgado. Cuando se combinan baja irradiación con temperatura alta, la planta llega a presentar hasta 18 hojas antes del primer racimo (Castro, 1992).

Las bajas intensidades de luz provocan menor crecimiento, plantas débiles y por lo tanto más susceptibles a patógenos y a los cambios bruscos del ambiente. Esta condición ambiental provoca también el aborto de flores y la malformación de frutos, causada por la disminución del crecimiento del tubo polínico. Cuando se tienen días cortos (menores de 12 horas), el ciclo vegetativo se alarga y el inicio de fructificación es tardío (Picken, 1984).

El rango de humedad relativa ideal para el cultivo de jitomate bajo invernadero es de 60 a 70 %, los excesos se pueden controlar con ventilación, aumentando la temperatura y controlando los riegos. La falta de humedad relativa se controla con la frecuencia de riegos o nebulización de agua (Rodríguez *et al.*, 1989). Cuando el ambiente dentro del invernadero es muy seco, los órganos masculinos y femeninos

de la flor se deshidratan y por ello no se produce la fecundación; por el contrario, un ambiente muy húmedo ocasiona aglomeración de polen lo que trae consigo fallas en la fecundación (Nuez, 2001).

La acumulación de sales es otro factor relacionado con el manejo intensivo del suelo, afectando el rendimiento por los cambios en las propiedades químicas y físicas (Liang *et al.*, 2013). Una alternativa para solucionar estos problemas es la hidroponía o cultivo sin suelo, en el cual las plantas crecen en una solución nutritiva, con o sin un sustrato como medio de soporte (Urrestarazu, 2000); esto permite desarrollar el sistema radical de las plantas en completa independencia del suelo. Para que las plantas de jitomate crezcan sin limitantes nutricionales, la solución nutritiva hidropónica debe tener un pH de 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) de 1.5 a 3.5 dS m⁻¹, y los nutrimentos minerales disociados, en forma iónica, y en proporciones y concentraciones que eviten precipitados y antagonismos (Adams, 2004). La planta modifica el consumo de nutrimentos en función de sus fases de crecimiento y desarrollo, condiciones climáticas (temperatura, intensidad y calidad de luz y humedad relativa), carga de frutos, CE, oxígeno disuelto en la solución nutritiva, flujo de la solución nutritiva y pH (Jones, 2005; Sonneveld y Voogt, 2009). Así, las proporciones y concentraciones de los iones en la rizósfera se modifican, pero aumenta la CE que se corrige con un sobrieriego que genere un drenaje de 10 a 40 % (Lieth y Oki, 2008). El sistema hidropónico es abierto cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite la infiltración en el sitio o se conduce fuera del invernadero; y es un sistema cerrado si la solución nutritiva se recoge para volverse a usar en el cultivo, previa esterilización y ajuste del pH, CE y nutrimentos.

Además de las condiciones físicas en un cultivo hidropónico, las plantas requieren del suministro de nutrientes, también conocidos como sales inorgánicas. Hay dos categorías principales de nutrientes: macronutrientes y micronutrientes; ambos son esenciales para el crecimiento y desarrollo del cultivo (FAO, 2014). Entre

los principales macronutrientes que requiere la planta, y al mismo tiempo los más costosos, para la producción hidropónica se encuentran el nitrógeno y el fósforo.

El nitrógeno (N) es la base de todas las proteínas; este elemento es fundamental para la construcción de estructuras, fotosíntesis, crecimiento celular, procesos metabólicos y producción de clorofila. Como tal, el nitrógeno es el elemento más común en una planta después del carbono y el oxígeno que se obtienen del aire. El nitrógeno es, por tanto, el elemento clave en la solución de nutrientes acuapónicos. Por lo general, el nitrógeno disuelto se encuentra en forma de nitrato, pero las plantas pueden utilizar cantidades moderadas de amoníaco e incluso aminoácidos libres para permitir su crecimiento. Las deficiencias de nitrógeno son obvias e incluyen el amarillamiento de las hojas más viejas, tallos delgados y poco vigor (FAO, 2014).

El fósforo (P) es utilizado por las plantas como columna vertebral del ácido desoxirribonucleico (ADN), como componente estructural de las membranas de fosfolípidos, y como trifosfato de adenosina (el componente para almacenar energía en las células). También, el fósforo es esencial en la fotosíntesis para la formación de aceites y azúcares, fomenta la germinación y el desarrollo de las raíces en plántulas. Las deficiencias de fósforo comúnmente causan un desarrollo deficiente de las raíces porque la energía no puede transportarse adecuadamente a través de la planta; por lo que las hojas se ven viejas y opacas, y las puntas de las hojas parecen quemadas (FAO, 2014).

2.1.1.5 Importancia de los nutrientes en los sistemas productivos (nitrógeno y fósforo).

La importancia del ciclo de los minerales dentro de los sistemas vivos es un tema que se ha abordado desde hace varias décadas; de hecho, los primeros estudios hacen referencia a los ciclos en océanos. Redfield (1958) sospechó que la

proporción de fosfato y nitrato debería ser aproximada a las características del protoplasma en general, y propone que los mecanismos que pueden mantener dicho patrón son la fijación del nitrógeno y su desnitrificación. Algunos años después comprobaría la teoría de que la vida en los océanos controla el ambiente y genera la proporción N:P, que según sus resultados es de 16:1 átomos; actualmente esta relación es utilizada en muchas áreas de la ciencia (Redfield *et al.*, 1963). Al mismo tiempo, algunos estudios en sistemas terrestres abordan el comportamiento de los nutrientes, específicamente sobre la absorción, difusión y almacenamiento de nutrientes en las plantas (Nye, 1958). De acuerdo con Nye, la difusión de fosfato, nitrato, amonio y potasio es menor a los requerimientos para el crecimiento óptimo de la planta; por lo que concluye que los procesos del suelo son el control primario sobre la absorción de nutrientes por cada unidad de raíz (Nye, 1961).

Odum fue uno de los pioneros en destacar la relación entre ciclaje de nutrientes y el grado de desarrollo de los ecosistemas, calificando a los sistemas agrícolas como inmaduros o de ciclos abiertos de nutrientes; lo anterior dado que en ellos existe una gran salida de elementos por cosecha y lixiviación, en contraposición con los ecosistemas terrestres naturales, de ciclos cerrados, con un uso eficiente de nutrientes y mínimas pérdidas por lixiviación (Odum, 1969).

Para minimizar el alto excedente y las pérdidas de nutrientes vegetales del sistema agrícola, la entrada de nutrientes al sistema necesita ser reducido. Esto puede resolverse aumentando el reciclaje dentro del sistema. En trabajos recientes se presentan ejemplos mostrando que es posible conservar y minimizar las pérdidas de nitrógeno y otros nutrientes de las plantas; lo anterior a través de un cuidadoso reciclaje dentro del agroecosistema, mediante la integración de la producción agrícola y animal. Sin embargo, para lograr altos niveles de producción y la eficacia del reciclaje es necesario que exista un buen equilibrio entre la intensidad de la producción animal y la producción de cultivos (Granstedt, 2000).

La comprensión de la dinámica de absorción de nutrientes es imprescindible para adaptar adecuadamente los insumos a las tasas de extracción, que varían a lo largo del ciclo de producción y están influenciadas por las condiciones climáticas, especialmente la temperatura y la radiación solar (Castilla, 2012). El desarrollo de criterios de diseño para sistemas acuapónicos requiere estimaciones de la absorción de nutrientes, y una comprensión más profunda de la dinámica de nutrientes del agua de cultivo (Rakocy y Hargreaves, 1993). Los cálculos del balance de nutrientes son ampliamente utilizados para aumentar la eficiencia de los nutrientes y reducir las pérdidas de los sistemas agrícolas (Cerozi y Fitzimmons, 2016).

El rendimiento y la eficiencia de los componentes utilizados en un sistema acuapónico pueden evaluarse mediante el análisis de la conversión del nitrógeno y fósforo, entre otros nutrientes, a la biomasa de peces; esto permitirá mantener altas tasas de crecimiento y altas tasas de densidad de población. Cuando el sistema tiene un correcto balance de nutrientes y está en equilibrio se puede obtener una alta productividad de peces y plantas, sin el uso de fertilizantes químicos, herbicidas o pesticidas (Endut *et al.*, 2016).

El nitrógeno (N) y fósforo (P) son sales solubles en agua, considerados en agricultura como nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal (Hawkesford *et al.*, 2012). Por lo general, la proporción N:P es utilizada para determinar los requerimientos de un organismo vegetal, y así establecer la proporción para su nutrición (Stewart *et al.*, 2005; Marschner, 2012). Por lo tanto, la relación N:P es un buen indicador para estimar el flujo de masas y la retención que se presenta dentro de un sistema productivo (Ennabili *et al.*, 1998; Mandal *et al.*, 2009). Gran parte de los estudios que se han llevado a cabo se relacionan con su aplicación y manejo, principalmente en cultivos como el de jitomate y pepino (Adekiya y Agbede, 2009; Mortley y Ntibashirwa, 2012). Sin embargo, la disponibilidad de estos nutrientes y la

tecnología para su procesamiento no se encuentra distribuida uniformemente en el mundo, por lo que existen problemas con su abasto, debido a la gran demanda que se está teniendo (Bruinsma, 2011; Tilman *et al.*, 2011). La disponibilidad de estos nutrientes en la forma de fertilizantes representa un factor clave para las cuestiones globales referentes con la seguridad alimentaria (Prud'homme, 2011).

En acuaponía, los nutrientes se integran al sistema por el alimento de los peces. Gran parte del alimento es ingerido por los peces y se utiliza para el crecimiento y el metabolismo, o excretado de forma soluble o sólida; mientras que el resto del alimento, que no es consumido, se descompone en el agua del cultivo. Muchos factores influyen en la disponibilidad de los nutrientes y la absorción de los mismos por las plantas, como son el pH, la temperatura, el oxígeno disuelto y la luz, entre otros. Con la finalidad de asegurar buenos rendimientos de los cultivos es necesario proporcionar a la planta niveles suficientes de nutrientes; por lo que es esencial comprender y controlar los ciclos de nutrientes en acuaponía (Eck *et al.*, 2019). Con la finalidad de ciclar los efluentes de la acuicultura para producir biomasa vegetal es necesario optimizar las tasas de reciclaje de fósforo y nitrógeno, principalmente (Goddek *et al.*, 2016); sin embargo, varios factores pueden influir en esto, como son la especie del pez, la densidad del cultivo, la etapa de desarrollo del organismo, las condiciones ambientales del sistema, la especie del organismo vegetal, entre otros. Por ello es importante comprender el funcionamiento de los ciclos de nutrientes en acuaponía.

2.2 Estudios recientes en acuaponía

A medida que aumenta la necesidad de producción sostenible de alimentos, los sistemas acuapónicos han tenido un crecimiento acelerado; por lo que en los últimos años se han desarrollado diversos estudios relacionados con las mejoras en las prácticas para hacer más eficientes este tipo de sistemas. Es así que el interés por la acuaponía se ha incrementado con la clara tendencia hacia cadenas de valor

integradas, mayor productividad en espacios reducidos y menor impacto ambiental (Palm *et al.*, 2018).

Aunque el cultivo de peces y plantas de una forma integrada se comenzó hace más de 2000 años en China, la acuaponía ha recibido gran atención en los últimos años; esto puede observarse en el número creciente de publicaciones en la literatura científica de 5 en 2010 a 127 para el 2020.

Las primeras investigaciones sobre la producción acuapónica moderna están basadas en la exploración de nuevos métodos, para disminuir la dependencia de tierra, agua y nutrientes en la cría de peces (Kledal y Thorarinsdottir, 2018); por lo que se comenzó a trabajar con sistemas de recirculación acuícolas (RAS) (Bradley, 2014), los cuales permiten densidades más altas de cultivo de peces con una menor cantidad de agua en un menor espacio. Sin embargo, las aguas residuales están altamente cargadas de contaminantes. Las investigaciones científicas, con la finalidad de lograr la eficiencia de los recursos en los sistemas de producción acuapónicos, se han enfocado en diversos aspectos, entre los que destacan: los impactos en el diseño de los sistemas (Palm *et al.*, 2018, Abbasi *et al.*, 2021), el manejo y control de pH en el agua del cultivo (Tyson *et al.*, 2011), tecnologías de aireación y filtración (Danaher *et al.*, 2013), nutrientes en el sistema (Delaide *et al.*, 2016), combinación de diferentes especies de peces y plantas, así como su asociación con comunidades microbianas (Endut *et al.*, 2010), manejo de plagas y enfermedades (Goddek *et al.*, 2015), prácticas de manejo (Tyson *et al.*, 2011), viabilidad socioeconómica (Junge *et al.*, 2017) y tendencias en la industria (König *et al.*, 2018).

Las últimas investigaciones se han enfocado en los avances tecnológicos, nuevos diseños de sistemas, desafíos en la horticultura y manejo, aprovechamiento y balance de los nutrientes (Yep y Zheng, 2019). Por otro lado, las tendencias en la investigación con respecto a estos sistemas de producción se enfocan en los tipos

de sistemas acuapónicos (Forchino *et al.*, 2017; Ru *et al.*, 2017; Gullian-Klanian *et al.*, 2018; Goddek y Keesman, 2018) y las especies vegetales y animales a utilizar (Rakocy *et al.*, 2006; El-Sayed 2006; Love *et al.*, 2014; Ru *et al.*, 2017; Knaus y Palm, 2017; Bailey and Ferrarezi, 2017; Adler *et al.*, 2000).

El presente estudio se enfoca en que una de las principales funciones de este tipo de sistemas es la reutilización de nutrientes, principalmente nitrógeno; lo anterior mediante la descomposición de los compuestos orgánicos para ponerlos a disposición para la absorción de las plantas (Yep y Zheng, 2019). Por ello, diversas investigaciones se han enfocado al entendimiento de la nutrición a través de los sistemas acuapónicos, relacionadas con procesos de nitrificación y el uso eficiente del nitrógeno (NUE) (Goddek *et al.* 2015; Hu *et al.*, 2015; Zou *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2017; Wongkiew *et al.* 2017; Schmutz *et al.*, 2017; Bartelme *et al.*, 2017; Cerozi and Fitzsimmons, 2017; Gullian-Klanian *et al.*, 2018; Scmutz *et al.*, 2020). A pesar de la cantidad de investigaciones previamente citadas, la eficiencia en la que los nutrientes son asimilados no ha sido ampliamente desarrollada; por lo que uno de los desafíos de la acuaponía es el cabal entendimiento del flujo de los nutrientes a través del sistema. Por lo antes mencionado, se llevó a cabo un análisis detallado del nitrógeno y fósforo en un sistema acuapónico con producción hiperintensiva de peces, así como su flujo hacia la producción vegetal de jitomate, la cual se aborda a continuación.

3. HIPÓTESIS

La dinámica de nutrientes en un cultivo acuapónico hiperintensivo repercute en el rendimiento del sistema, por lo que, si se da seguimiento al flujo de nutrientes a través de las etapas productivas de *Oreochromis niloticus*, se identificará aquella que promueve el mayor aprovechamiento del nitrógeno y fósforo.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general.

Determinar el flujo de nitrógeno y fósforo en diferentes etapas productivas de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico hiperintensivo tilapia-jitomate, estableciendo las mejores condiciones de crecimiento, para incrementar el rendimiento del sistema.

4.2 Objetivos particulares.

- Determinar la densidad de población en el cultivo de la tilapia, para establecer la capacidad máxima de carga del sistema hiperintensivo.
- Caracterizar el flujo de nutrientes en tilapia durante el ciclo de vida del pez en un cultivo hiperintensivo, mediante la cuantificación del nitrógeno y fósforo.
- Evaluar un cultivo acuapónico en tres etapas productivas de tilapia, para determinar la etapa más productiva para el sistema.
- Determinar la dinámica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en diferentes etapas de producción de tilapia y jitomate en acuaponía, para establecer la eficiencia del sistema de producción.
- Evaluar la eficiencia del sistema acuapónico en tres etapas productivas de tilapia, mediante la determinación del flujo de nitrógeno y fósforo.

5. METODOLOGÍA

El flujo de nutrientes en el sistema acuapónico de tilapia y jitomate en tres etapas productivas del pez se llevó a cabo siguiendo la ruta de los nutrientes, a través del sistema acuícola hiperintensivo, para posteriormente integrarlo al sistema hidropónico; lo anterior, con la finalidad de identificar la ruta de estos nutrientes en todas las partes del proceso, para finalmente integrarlos y evaluar el sistema de producción. La Figura 7 muestra el diagrama de flujo con los pasos para la elaboración del presente estudio.

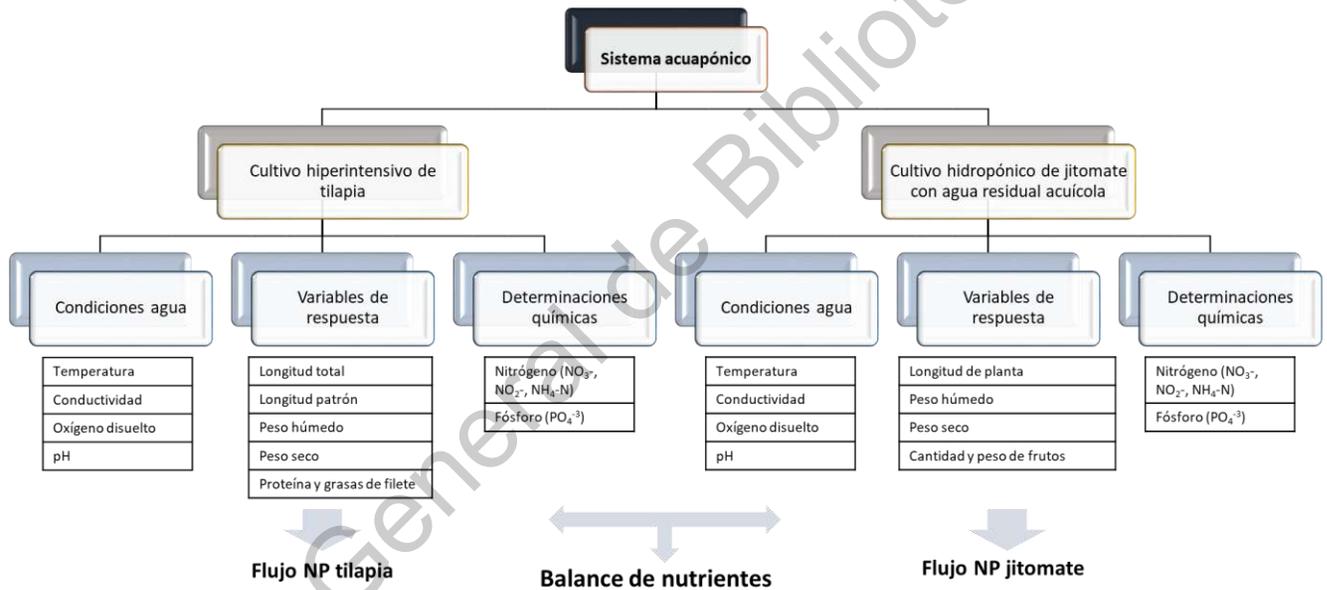


Figura 7. Esquema metodológico para obtener el flujo de nutrientes en un sistema acuapónico hiperintensivo de tilapia-jitomate.

5.1 Ubicación del área de investigación.

El proyecto se llevó a cabo en el área experimental acuícola del Laboratorio de Bioingeniería perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala. El Campus Amazcala está ubicado en el Municipio del Marqués, Estado de Querétaro (Figura 8), el cual se encuentra localizado en el sector suroeste del Estado entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud norte y 100° 24' longitud oeste, a 1850 msnm. El poblado de Amazcala pertenece al municipio de El Marqués, el cual colinda al oeste con el municipio de Querétaro, al norte con el estado de Guanajuato, el este con el municipio de Colón y al sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. La temperatura media anual oscila entre los 18 °C y los 24 °C, con un clima predominante subtropical, templado semiseco.



Figura 8. Poblado de Amazcala, municipio de El Marqués, estado de Querétaro (Google Maps, 2018).

5.2 Determinación de la densidad de población, en el cultivo de la tilapia, para establecer la capacidad máxima de carga del sistema hiperintensivo.

5.2.1 Diseño experimental

Con la finalidad de determinar la densidad de población máxima que pudiera manejarse en el cultivo de tilapia se implementó un sistema de recirculación acuícola, cuyo diseño experimental consistió en dos factores: densidad de cultivo y temperatura. Para la densidad poblacional del cultivo se consideraron tres niveles (67, 135 y 270 peces/m³). Considerando la capacidad de los estanques utilizados en el experimento (300 L de volumen), la cantidad de organismos cultivados fue de 20, 40 y 80 peces por estanque, como se muestra en la Tabla 1. Los peces tuvieron un peso promedio de 1.75 g a la siembra. Con respecto a la temperatura, se consideraron dos niveles, el primero con temperatura controlada a 28 °C y otro a temperatura ambiente. Cada tratamiento se llevó a cabo por triplicado.

Tabla 1. Tratamientos de densidades de población y temperaturas en el sistema de recirculación acuícola de tilapia.

Tratamientos	Densidad de población (ind/0.3 m ³)	Temperatura (°C)
T1	20	28 °C
T2	40	28 °C
T3	80	28 °C

T4	20	Temperatura ambiente
T5	40	Temperatura ambiente
T6	80	Temperatura ambiente

5.2.2 Descripción del sistema

Se utilizaron 18 estanques de polipropileno cuadrados color negro con puntas redondeadas, con una capacidad máxima de 500 litros y dimensiones de 50 cm de ancho, 120 cm de largo y 60 cm de profundidad.

Para la recirculación del sistema se utilizó un colector de agua con una capacidad de 1,000 litros, con la finalidad de mantener el nivel de los estanques experimentales. Del colector, el agua fue transportada hacia los tanques experimentales con una bomba sumergible marca BOYU para 10,000 L7H. Para la filtración mecánica y biológica se empleó un filtro comercial de la marca BOYU EFU-13500 Pond Filter con luz UV, de 115 V, 50 W/60 W, de una capacidad de 8,000 a 15,000 L/h de 54 cm X 37.9 cm X 55.2 cm. La temperatura de los tratamientos con control de temperatura fue regulada con un equipo Electro EVO 230V Electric Engineering para un flujo de agua de 1,000 a 17,000 L/h.

En cada estanque se conectó un tubo de PVC de 1½" de 30 cm de alto, el cual permitió un nivel máximo de 300 L. Una vez que los tanques de cultivo llegaban a su capacidad máxima de agua, el sobrante fue transportado por gravedad para drenar al tinaco colector que se encontraba enterrado, en donde el agua caía a una altura de 60 cm; esta acción apoyó la oxigenación del agua (Figura 9).



Figura 9. Instalación en los estanques del sistema de recirculación acuícola.

El agua del interior del tinaco colector enterrado fue transportada hacia el filtro con una bomba sumergible. Después de pasar por el proceso de filtración, el agua regresaba a cada uno de los tanques de cultivo a través de una tubería (PVC 1") con una válvula que reguló el flujo a 2 L/min.

La Figura 10 muestra la distribución de los tratamientos, el cual fue una distribución completamente al azar, así como el flujo y la recirculación del sistema acuícola para el cultivo de la tilapia.

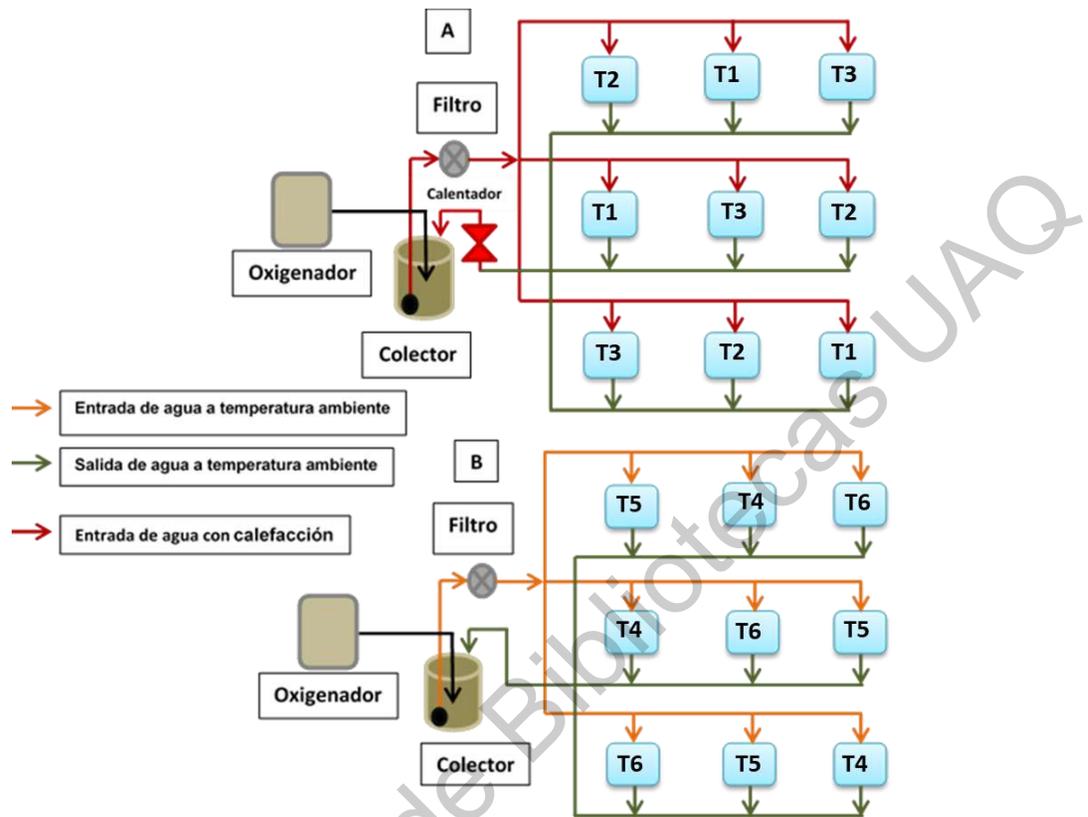


Figura 10. Distribución de tratamientos en el sistema de recirculación acuícola por tratamientos de densidad y temperaturas.

Previo a la siembra de los peces, el agua se dejó ciclar durante 15 días con el sistema en funcionamiento. Este periodo de maduración es necesario para que se asiente en el filtro una colonia de bacterias que son de beneficio para transformar las sustancias tóxicas que se produzcan en el sistema de recirculación. El mantenimiento de los estanques consistió en recambios parciales del agua semanalmente.

Los peces se alimentaron, a una proporción de 8% con respecto a su biomasa total, con alimento comercial NUTRIPEC de 1.5 mm, de acuerdo a las características descritas en la Tabla 2. La frecuencia de alimentación se ajustó a tres provisiones ofrecidas diariamente a las 8:00, 12:00 y 16:00 h.

Tabla 2. Características de alimento suministrado a los peces.

Propiedad	Porcentaje	Propiedad	Porcentaje
Humedad	12 %	Fibra cruda	3 %
Proteína	44 %	Cenizas	11 %
Grasa	15 %	Extracto libre de nitrógeno (carbohidratos)	15 %

5.2.3 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales del agua del cultivo acuícola se monitorearon diariamente, dos veces por día, a las 8:30 y 14:30 horas de manera sistemática durante la duración del experimento; las condiciones monitoreadas fueron las siguientes: pH, temperatura (°C) y oxígeno disuelto (O₂ mg/L). Las mediciones se llevaron a cabo con un medidor multiparamétrico Hach serie HQ40d.

5.2.4 Variables de respuesta

Durante la etapa de experimentación se determinaron estimadores de crecimiento de los organismos cultivados en los diferentes tratamientos; las variables medidas fueron número inicial de organismos, número final de organismos, peso inicial promedio (PIP), peso final promedio (PFP), talla inicial promedio (TIP) y talla final promedio (TFP). A partir de estas mediciones, se llevaron a cabo los cálculos para obtener el peso ganado (PG) (%), tasa de crecimiento específico (TCE) (%/día) y tasa de supervivencia (TS) (%). Con la finalidad de medir

el peso (g) se utilizó una balanza Precisa de 650 g (D.S 0.01g) y un vernier Mitutoyo modelo CD-6PSX para medir las tallas (mm) de los peces.

Peso inicial promedio (*PIP*)

$$PIP = \frac{\text{Peso inicial (g)}}{\text{Número inicial de organismos}} \quad (1)$$

Peso final promedio (*PFP*)

$$PFP = \frac{\text{Peso final (g)}}{\text{Número inicial de organismos}} \quad (2)$$

Talla inicial promedio (*TIP*)

$$TIP = \frac{\text{Talla inicial (mm)}}{\text{Número inicial de organismos}} \quad (3)$$

Talla final promedio (*TFP*)

$$TFP = \frac{\text{Talla final (mm)}}{\text{Número inicial de organismos}} \quad (4)$$

Peso ganado (*PG*)

$$PG (\%) = \frac{PFP - PIP}{PIP} \times 100 \quad (5)$$

Tasa de crecimiento específico (*TCE*)

$$TCE (\%/\text{día}) = \frac{\ln PFP (\text{g}) - \ln PIP (\text{g})}{\text{Tiempo}} \times 100 \quad (6)$$

Tasa de supervivencia (*TS*)

$$TS (\%) = \frac{\text{Número final de organismos}}{\text{Número inicial de organismos}} \times 100 \quad (7)$$

5.2.5 Determinaciones químicas.

El nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) fueron medidos durante una semana continua durante el experimento, con la finalidad de conocer el comportamiento diario de los nutrientes. Por otro lado, se llevaron a cabo mediciones cada tres semanas durante todo el experimento. Las determinaciones se realizaron con los métodos propuestos por HACH (1997), utilizando el espectrofotómetro DR/6000 Hach.

Para llevar a cabo las determinaciones químicas en el agua se colectaron 250 ml del agua de los estanques de los diferentes tratamientos. El agua se colecta directamente de los estanques en recipientes de plástico, procurando obtener la muestra del mismo lugar para minimizar las variaciones. Los análisis se llevaron a cabo inmediatamente después de la colecta de la muestra.

Con la finalidad de conocer si las concentraciones de estos nutrientes comprometen el bienestar de los organismos se tomaron en consideración los intervalos de concentraciones aceptables para las especies trabajadas de acuerdo a Timmons *et al.* (2002) (Tabla 3).

Tabla 3. Niveles de nutrientes en el medio aceptables para el cultivo de tilapia en sistemas de recirculación acuícola.

Compuesto	Concentración (peces)
Nitrógeno total (NT)	<3.0
Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$)	<1

Nitrito (NO₂)	<1
Nitrato (NO₃)	0-400

Fuente: Timmons *et al.*, 2002.

Cada una de las determinaciones se hizo como a continuación se describen de manera particular:

- *Nitrógeno amoniacal (NH₃-N).*

Esta determinación se llevó a cabo de acuerdo al método 8038 de los métodos HACH para el espectrofotómetro DR6000, denominado método de Nessler con intervalo de 0.02-2.50 mg/L NH₃-N. Mediante este método se utiliza un estabilizante mineral que disminuye la dureza en las muestras y un agente dispersante (alcohol polivinílico) que contribuye a la formación de la coloración en la reacción del reactivo Nessler con los iones de amonio. Lo anterior ocasiona que se forme un color amarillo proporcional a la concentración de amoníaco que puede ser medido a 425 nm (Adekiya *et al.*, 2009).

- *Nitritos (NO₂⁻).*

La determinación de nitritos se hizo de acuerdo al método 8057 de los métodos HACH para el espectrofotómetro DR6000, denominado método de diazotación con intervalo de 0.002-0.300 mg/L NO₂-N. En este método, el nitrito de la muestra reacciona con el ácido sulfanílico para formar sal de diazonio que reacciona con el ácido cromotrópico para producir un complejo de color rosa; este color es proporcional a la cantidad de nitrito presente y puede medirse a 507 nm (Adekiya *et al.*, 2009).

- *Nitratos (NO₃-)*.

La determinación de nitratos se hizo de acuerdo al método 8039 de los métodos HACH para el espectrofotómetro DR6000, denominado método de reducción de cadmio con intervalo de 0.3-30.0 mg/L NO₃-N. En este procedimiento, el cadmio metálico reduce a nitrito el nitrato presente en la muestra. El ion nitrito reacciona en un medio ácido con el ácido sulfanílico para formar una sal de diazonio intermedia. Esta sal reacciona con el ácido gentísico para formar una solución de color ámbar que se mide a 500 nm (Adekiya *et al.*, 2009).

5.2.6 Composición bromatológica

Con la finalidad de monitorear si la densidad de población de cultivo afecta la calidad de la carne de los peces se llevó a cabo la determinación del análisis proximal del filete de la tilapia. Las determinaciones evaluadas fueron humedad, cenizas totales, lípidos totales y proteínas.

El contenido de humedad se determinó utilizando un horno de recirculación forzada marca Dinamica AP120. Durante el procedimiento se calienta la muestra a 65 °C durante 24 h. Pasadas las 24 h, las muestras se pesan para determinar su contenido de agua por diferencia de peso expresado en % de humedad (g de H₂O/100 g de muestra) (AOAC, 1984).

Contenido de Humedad

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso de agua en la muestra (g)}}{\text{Peso de la muestra húmeda (g)}} \times 100 \quad (8)$$

Para las cenizas se tomó un gramo de muestra que posteriormente se incineró a 500 °C en una mufla de marca Felisa 500 durante seis horas, para obtener el peso

expresado en cenizas totales (contenido mineral) o en % de materia seca (g) (AOAC, 1984).

Peso de la muestra

$$Pm (g) = Pcm - Pcv \quad (9)$$

Donde:

Pm = Peso de la muestra

Pcm = Peso de crisol con muestra

Pcv = Peso de crisol vacío

Peso de cenizas

$$Pc (g) = Pcc - Pcv \quad (10)$$

Donde:

Pc = Peso de cenizas

Pcc = Peso de crisol con cenizas

Pcv = Peso de crisol vacío

Cenizas base seca

$$\text{Ceniza base seca (\%)} = \frac{\text{Peso de las cenizas (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100 \quad (11)$$

Cenizas base húmeda

$$\text{Ceniza base húmeda (\%)} = \frac{(\% \text{ ceniza base seca})(\% \text{ de materia seca})}{100} \quad (12)$$

Materia orgánica

$$\text{Materia orgánica (\%)} = 100 - (\% \text{ de ceniza en base seca}) \quad (13)$$

Para la determinación de proteínas se utilizó el método de Kjeldahl, el cual se basa en la combustión en húmedo de la muestra por calentamiento con ácido sulfúrico concentrado en presencia de catalizadores metálicos; lo anterior, con la finalidad de reducir el nitrógeno orgánico de la muestra hasta amoníaco, el cual queda en solución en forma de sulfato de amonio. El digerido, una vez alcalinizado, se destila en forma directa o por arrastre de vapor para desprender el amoníaco; posteriormente, se titula con un álcali estándar para obtener el contenido de nitrógeno orgánico. La determinación de proteína se realizó de acuerdo a los métodos estándar de la AOAC (1984).

Porcentaje de Nitrógeno (%)

$$\% N = \frac{(V-V_0) \times N \times \text{meq} \times 100}{\text{Peso de muestra (g)}} \quad (14)$$

Donde:

V= ml de H₂SO₄ empleados en la titulación de la muestra

V₀= ml de H₂SO₄ en el blanco

N= Normalidad de H₂SO₄

Meq= miliequivalentes de N₂ 0.014 g

Nota= 1 ml de H₂SO₄ 0.01 N = 0.14 mg de N-NH₄

En la determinación de grasas totales por microondas se utilizó un equipo de Microondas marca Anton Paar Multiwave Pro Solv MF100. Se tomaron de 2 a 5 g de muestra en los viales de microondas, para posteriormente colocarles una mezcla de acetona:hexano (1:2 V/V), y ponerlos dentro del microondas para iniciar el método de extracción. Se filtró a vacío en tubos previamente pesados para separar

el solvente de los sólidos. Para evaporar el solvente, se colocaron los tubos en baño maría en un Thermo Scientific LabLine 18802AQ, y posteriormente se utilizó el horno para evaporar por completo el solvente. Se pesaron los tubos con el extracto sin solventes, y se hicieron los cálculos de grasas totales con la siguiente fórmula:

Porcentaje de grasa total (%)

$$\% \text{ de grasa} = \frac{(A-B)}{C} \times 100 \quad (15)$$

Donde:

A= Peso del tubo más las grasas

B= Peso del tubo vacío

C=Peso de la muestra seca

5.3 Cuantificación de nitrógeno y fósforo en tilapia durante el ciclo productivo del pez, en un cultivo acuícola hiperintensivo.

De acuerdo a los datos obtenidos en el anterior experimento, con respecto a la densidad máxima de cultivo de la tilapia, se realizó la cuantificación de NP durante tres etapas productivas del pez; lo anterior con la finalidad de determinar el flujo de nutrientes en un sistema de recirculación acuícola en un cultivo hiperintensivo.

5.3.1 Diseño experimental

Se trabajó con tres tratamientos considerando tres etapas productivas de los peces correspondientes a crías, juveniles y adultos, bajo una densidad de cultivo de 270 peces/m³. Cada tratamiento fue evaluado por triplicado como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Tratamientos de diferentes etapas de desarrollo de *Oreochromis niloticus* en un sistema de recirculación acuícola.

Tratamientos	Etapas de desarrollo
T1	Cría
	Cría
	Cría
T2	Juvenil
	Juvenil
	Juvenil
T3	Adulto
	Adulto
	Adulto

5.3.2 Descripción del sistema

El sistema de recirculación acuícola utilizado fue el descrito en la sección 4.2.2., haciendo uso únicamente de la sección con el control de temperatura (Figura 11).

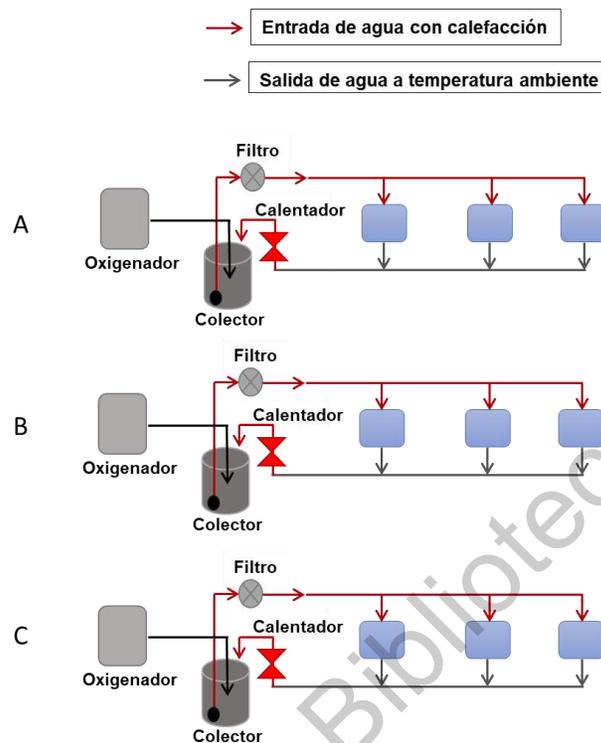


Figura 11. Distribución de tratamientos en un sistema de recirculación acuícola de tilapia: A) crías, B) juveniles y C) adultos.

El cultivo consistió en tres tratamientos correspondientes a crías, juveniles y adultos, con un peso corporal promedio de 1.79 g, 36.13 g y 72.96 g, respectivamente. Cada tratamiento se trabajó por triplicado, por lo que los peces fueron distribuidos en 9 estanques con 80 individuos por estanque con volumen de 300 L, dando una densidad de 270 peces/m³. La alimentación consistió en tres tomas al día con alimento comercial balanceado de la marca MaltaClayton, de acuerdo a cada etapa de desarrollo del pez; los porcentajes de alimento fueron 10% para las crías, 5% para los juveniles y 3% para los adultos, respecto de su peso corporal; las características del alimento se muestran en la Tabla 5. El agua del cultivo se mantuvo a una temperatura de 28 °C y un intervalo de oxigenación de 4-6 mg/L de O₂. El manejo de los tanques implicó la eliminación de las heces junto con un intercambio parcial de agua semanal, correspondiente al 30%.

Tabla 5. Características del alimento suministrado a los peces.

Tratamientos	Etapas del alimento comercial	Proteína	Grasa	Tamaño
Cría	Crías	50 %	12 %	0.8-1.5 mm
Juvenil	Desarrollo	45 %	16 %	2.5 mm
Adulto	Crecimiento	35 %	3 %	3.2 mm

5.3.3 Condiciones ambientales

Con la finalidad de verificar que el control de las condiciones se estuviera llevando a cabo de manera adecuada se hicieron mediciones periódicas del oxígeno disuelto, la temperatura y el pH en el agua; dichas mediciones se hicieron con un medidor multiparamétrico (Hach series HQ40d). En caso de que alguno de los parámetros antes mencionados estuviera fuera de los rangos requeridos, se llevaron a cabo los ajustes necesarios.

5.3.4 Determinaciones químicas (contenido de nutrientes).

Las determinaciones químicas se llevaron a cabo en tres fases, para conocer el comportamiento de los nutrientes durante 24 horas, 5 días y 60 días. Para la fase de 24 horas, se tomaron muestras cada 4 horas; para la fase de 5 días la toma de muestras fue una vez por día; y finalmente, para la fase de 60 días, se tomaron muestras 1 vez por semana. Se realizaron las determinaciones de las diferentes formas del nitrógeno presentes en el agua (amonio, nitritos y nitratos), así como del fósforo.

La metodología llevada a cabo se muestra en la sección 4.2.5 previamente descrita.

5.3.5 Determinación del metabolismo aeróbico.

La determinación de los aspectos fisiológicos y energéticos de los peces requiere de análisis a partir del flujo de materia y energía. La ecuación que mejor describe este proceso es la ecuación general del flujo de energía (Klekowski and Duncan, 1975). Esta ecuación considera que la energía ingerida por la alimentación o consumo (C) es igual a la energía para la producción de tejido vivo y/o gametos (P) más la energía utilizada en el metabolismo (R) más la energía perdida en la excreción fecal (F) más la energía perdida como excreción nitrogenada (U); la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$C = P + R + F + U \quad (16)$$

Para llevar a cabo esta determinación se utilizó el método de cámaras respirométricas semi-cerradas (Lampert, 1984), que consiste en hacer mediciones de la concentración de oxígeno (O₂) en una cámara de volumen conocido (500 ml) al principio y al fin de un lapso de tiempo (4 horas). Así, se obtiene la concentración inicial y final de O₂. Este método considera que la reducción de oxígeno en la cámara depende del peso del animal, el volumen de agua, la duración del experimento y la temperatura del ambiente. En cada una de las mediciones se obtuvo la concentración de amonio NH₄⁺ por el método de Nessler, con la finalidad de obtener la razón O:N que indica el estado fisiológico que tiene el organismo.

Se seleccionaron al azar 3 individuos de cada tratamiento para medir el metabolismo aeróbico (consumo de oxígeno = QO₂) en cada una de las etapas productivas del pez; para ello se empleó el método de cámara respirométrica cerrada con temperatura constante y volumen de agua conocido, descrito anteriormente (Timmons *et al.*, 2002, Soto-Zarazúa *et al.*, 2010). Se tomaron

mediciones del oxígeno disuelto y el amonio cada 4 horas (14:00, 18:00, 22:00, 02:00, 06:00 y 10:00 hrs) durante un ciclo de 24 horas. Todos los peces utilizados para determinar el QO_2 fueron sacrificados en hielo inmediatamente después de concluido el ciclo de 24 horas, con la finalidad de obtener su peso seco y determinar la relación del oxígeno consumido por la biomasa (Steffensen, 1989).

La relación atómica O:N se calculó de acuerdo con Handa *et al.* (2013) con la siguiente ecuación:

$$\text{Relación O: N} = \frac{\text{Oxígeno consumido}}{\text{Amonio excretado}} \quad (17)$$

5.3.6 Variables de respuesta del cultivo de tilapia (estimadores de crecimiento).

Las variables de respuesta de los peces se obtuvieron a través de biometrías de una muestra de la población de cada tratamiento semanalmente y son las previamente descritas en la sección 4.2.4.

Por otro lado, la relación peso-talla es un parámetro importante para evaluar el factor de crecimiento, salud y bienestar general de los peces (Anani y Nunoo, 2016); este parámetro también proporciona información indirecta de la madurez, la reproducción, la nutrición y el estado de salud de las poblaciones (Rodríguez *et al.*, 2017). Por ello, este factor se estimó en las tres etapas de desarrollo de la tilapia. La relación longitud-peso se analizó mediante una regresión lineal, calculando los valores de a y b a partir de la ecuación $W = aL^b$ (Foroese, 2006); en donde W es el peso en gramos y L la longitud en centímetros, dicha fórmula puede ser transformada en:

$$\log(W) = \log(a) + b \log(L) \quad (18)$$

En esta ecuación, el coeficiente de regresión b proporciona información acerca del tipo de crecimiento; si $b=3$ el crecimiento es isométrico, pero si b es menor a 3 significa que el pez se adelgaza con el aumento en la longitud y el crecimiento será alométrico negativamente. En el caso contrario, si b es mayor a 3 entonces el pez es más pesado, mostrando un crecimiento alométrico positivo; esto puede reflejar una condición óptima en caso de que se le esté proporcionando al pez un alimento alto en proteína (Jisr *et al.*, 2018).

5.4 Evaluación de un cultivo acuapónico en tres etapas productivas de tilapia con jitomate.

Con respecto a los resultados obtenidos en la sección anterior, se estableció un sistema de recirculación acuapónico tilapia-jitomate, para evaluar tres etapas de desarrollo del pez en un cultivo hiperintensivo de capacidad máxima de 80 kg/m³, teniendo como control un sistema hidropónico convencional; lo anterior, con la finalidad de validar la asimilación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) excretados por los peces en el cultivo vegetal, así como determinar la calidad final de ambos productos.

5.4.1 Diseño experimental.

El experimento consistió en 3 tratamientos acuapónicos y un hidropónico (control), como se menciona a continuación:

- Tratamiento 1. Cultivo acuapónico tilapia-jitomate utilizando agua proveniente de cría de tilapia en un cultivo hiperintensivo.
- Tratamiento 2. Cultivo acuapónico tilapia-jitomate utilizando agua proveniente de

juvenil de tilapia en un cultivo hiperintensivo.

- Tratamiento 3. Cultivo acuapónico tilapia-jitomate utilizando agua proveniente de adulto tilapia en un cultivo hiperintensivo.
- Control: Cultivo hidropónico de jitomate convencional utilizando solución nutritiva comercial (Peters professional hydroponic special fertilizer 5-11-26) (Tabla 6).

Tabla 6. Tabla de composición de nutrientes (ppm) de la solución nutritiva Peters profesional hydroponic special fertilizer 5-11-26.

Nutrientes	ppm
Nitrógeno (N)	150
Fósforo (P)	48
Potasio (K)	216
Magnesio (Mg)	60
Azufre (S)	80
Hierro (Fe)	3
Manganeso (Mn)	0.5
Zinc (Zn)	0.15
Cobre (Cu)	0.15
Boro (B)	0.5
Molibdeno (Mo)	0.1
Calcio (Ca)	116

Para la elaboración del presente experimento se adaptaron las condiciones acuáticas del sistema de recirculación acuícola requeridas por la tilapia, controlando la temperatura y el oxígeno disuelto, de acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos anteriormente descritos.

5.4.2 Descripción del sistema

El sistema consistió en tres unidades acuapónicas con estanques de polipropileno color negro con drenaje cónico de 1.5 m³ de capacidad máxima, con dimensiones de 1.80 m de diámetro y 60 cm de altura. Cada estanque acuícola se equipó con una bomba sumergible con una capacidad de 750 W de la marca Truper®, que permitió la recirculación del agua en el sistema acuícola con el filtro y hacia el cultivo vegetal. Para la filtración mecánica y biológica se utilizaron filtros comerciales de la marca BOYU EFU-13500 Pond Filter con luz UV, de 115 V, con una capacidad de 8,000 a 15,000 L/h. La conducción hidráulica se llevó a cabo con tubería de PVC de ½" y cédula 40. El control de la temperatura se hizo con calentadores de inmersión de agua de 127 V, 60 Hz, 750 W.

La conducción del agua al cultivo vegetal se hizo mediante tubo de PVC de ½", controlado por válvulas de ½", pasando por un filtro para disminuir el pH; dicho filtro consistió en un contenedor de 70 L con fibra de coco y piedra pómez. Posterior al filtro de pH, el agua se condujo a reservorios con una capacidad de 70 L, en donde el agua se contenía para ser distribuida al cultivo vegetal con bombas de 60 W. El mecanismo para la distribución del agua al cultivo vegetal se controló mediante temporizadores, y el riego fue conducido a través de manguera, tubín y estacas para riego por goteo. El cultivo vegetal se llevó a cabo en bolis de fibra de coco, colocándose 30 bolis, dando un total de 60 plantas de jitomate por tratamiento, equivalentes a una densidad de siembra de 12 plantas/m². El experimento tuvo una

duración de 18 semanas, durante las cuales sólo se llevó a cabo un recambio de agua en el momento en el que el nitrógeno amoniacal sobrepasó los límites permisibles para la salud y sobrevivencia de los peces (Figura 12).

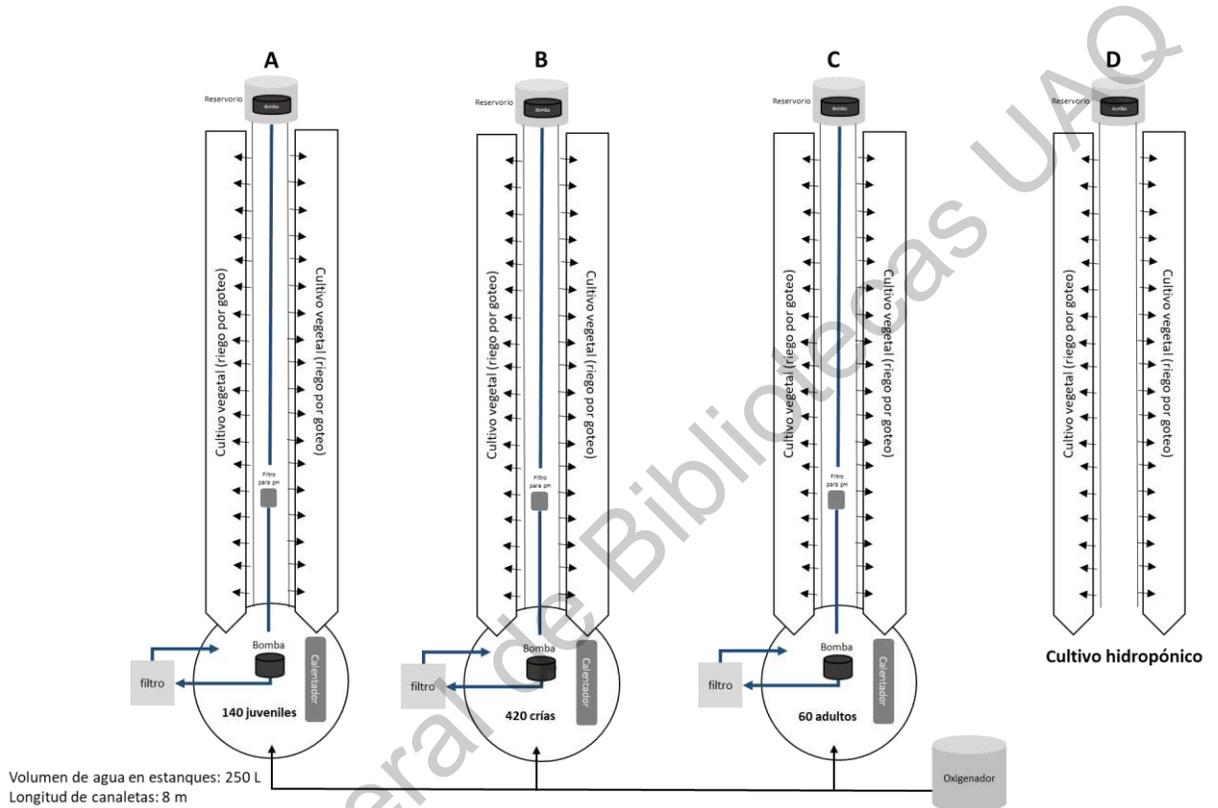


Figura 12. Distribución de tratamientos en sistemas de recirculación acuícola de cultivo de tilapia: A) juveniles, B) crías, C) adultos, y D) cultivo hidropónico.

5.4.2.1 Sistema acuícola.

En el sistema acuícola, los estanques utilizados tenían un volumen de 250 L; en ellos se cultivaron tilapias de la especie *Oreochromis niloticus* variedad súper macho en sus etapas de cría, juvenil y adultos. Los organismos utilizados en este

estudio fueron obtenidos de la granja Zidedho ubicada en Ixmiquilpan, estado de Hidalgo en su etapa de alevinaje; y fueron alimentados y crecidos en el invernadero de producción acuícola perteneciente al Laboratorio de Bioingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. La densidad de cultivo máxima en el sistema fue de 80 kg/m³ a la cosecha, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Biomasa de cultivo de la tilapia en las diferentes etapas de desarrollo (tratamientos).

Tratamiento	Volumen estanque	# de individuos	Biomasa inicial total	Promedio biomasa individual inicial	Biomasa final esperada	Promedio biomasa individual final esperada
Crías	250 L	420	1.528 kg	3.64 g	20 kg	50 g
Juveniles	250 L	140	8.680 kg	62 g	20 kg	150 g
Adultos	250 L	60	11.779 kg	196.32 g	20 kg	350 g

A los individuos se les proporcionó alimento comercial de la marca Malta Clayton de acuerdo a su etapa de desarrollo, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 8. Los pellets fueron suministrados por alimentadores automatizados, diseñados y fabricados en el Laboratorio de Bioingeniería; dichos alimentadores estaban compuestos por una tolva funcionando con un motor reductor, un tornillo sin fin, y un PLC como control eléctrico. La caja de control eléctrico reguló la frecuencia y velocidad de la fuente de alimentación (Figura 13). Los alimentadores se suspendieron sobre cada estanque, y se le colocó a cada uno el alimento indicado para cada etapa de desarrollo del pez. El suministro del alimento fue 3 veces al día a las 9:00, 13:00 y 17:00 hrs, en los porcentajes de la biomasa requerida

para cada etapa. La cantidad de alimento proporcionado se ajustó 1 vez por semana, de acuerdo al aumento en la biomasa de los organismos en cultivo.

Tabla 8. Esquema de alimentación por etapa de desarrollo de *Oreochromis niloticus*.

Etapa	Alimento	Peso del pez	Ración de alimentación	Proteína	Grasa	Tamaño de pellet
Cría	Biofingerling 1.5	2-20 g	6%	45%	16%	1.5 mm
	Biofingerling 2.5	20-50 g	4%	45%	16%	2.5 mm
Juvenil	Grow-tilapia 2	50-200 g	3%	35%	3%	3.2 mm
Adulto	Grow tilapia 3	200-400 g	2%	30%	3%	3.2 mm

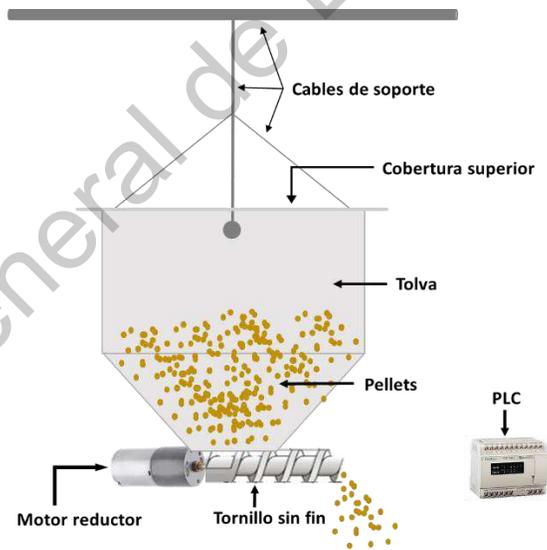


Figura 13. Diagrama del alimentador automatizado para los peces en el cultivo.

5.4.2.2 Sistema hidropónico.

La especie vegetal que se utilizó fue el jitomate saladet (*Solanum lycopersicum L.*), variedad Río Grande de crecimiento determinado, con madurez relativa semi-precoz y tamaño máximo del fruto de 120 g.

Se utilizaron semilleros de unicel para germinación de 200 cavidades, rellenos con sustrato de peat moss. Posterior a la siembra, las charolas se mantuvieron bajo condiciones de invernadero hasta que alcanzaron las condiciones óptimas de trasplante (15 a 20 cm de altura o 7 hojas verdaderas). Las plántulas de jitomate se trasplantaron al tener 7 hojas verdaderas, en una distribución de 8 canales con un distanciamiento de 25 cm entre planta y pasillos de 50 cm, haciendo una densidad de siembra de 60 plantas en una superficie de 4.8 m² (12 plantas/m²). A partir de ese momento, se contabilizó el número de hojas por planta cada semana, hasta la primera poda. Posteriormente se comenzaron a eliminar algunas hojas para evitar desbalance hídrico, energético y nutricional en la planta. La eliminación de hojas también permite una correcta aireación del cultivo, evitando la aparición de enfermedades fúngicas (Castilla, 2012).

El riego de cada tratamiento fue con agua residual de cultivo acuícola de cría, juvenil y adulto de tilapia, así como un cultivo hidropónico regado con agua con solución nutritiva previamente señalada. Se proporcionaron 3 riegos por día a las 9:00, 13:00 y 17:00 hrs, los cuales fueron suministrados mediante un sistema de riego por goteo y controlado por temporizadores. El suministro comenzó con 1.5 L de agua por planta por día en la etapa de vegetativa, ajustándose a 3 L de agua por día en la etapa de floración y fructificación.

5.4.3 Condiciones ambientales (calidad del agua)

La temperatura, el pH y el oxígeno disuelto en la acuicultura son condiciones que pueden afectar el desarrollo de los peces y comprometer la calidad del agua. Para los cultivos hidropónicos de plantas, la formulación de la solución nutritiva, el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura de la solución son los factores que mayor influencia tienen en el desarrollo vegetal (Patil *et al.*, 2020). Por los motivos antes señalados, se realizó el monitoreo de estos factores físicos en el agua de los peces que, a su vez, era el agua de riego para el cultivo hidropónico. Las mediciones se tomaron diariamente en los estanques acuícolas con los tres estados productivos de la tilapia, así como en los reservorios que regaban el cultivo hidropónico de jitomate. Cabe señalar que los reservorios que contenían el agua proveniente del cultivo acuícola, y que distribuían el agua al cultivo vegetal, no recibieron ningún tratamiento o adición externa. Las mediciones se llevaron a cabo con un medidor multiparamétrico (Hach series HQ40d).

5.4.4 Variables de respuesta.

Las variables de respuesta de los peces se obtuvieron a través de biometrías de una muestra de la población de cada tratamiento semanalmente, y son las previamente descritas en la sección 4.2.4.

Con la finalidad de conocer el estado de salud de los peces en el sistema, al comienzo y al final del experimento se llevó a cabo una evaluación de la relación talla-peso (Asase *et al.*, 2016); esta relación proporciona información indirecta de crecimiento, madurez y reproducción, nutrición y estado de salud de las poblaciones (Cifuentes *et al.*, 2012).

Las variables de respuesta del cultivo vegetal se obtuvieron a través de biometrías llevadas a cabo semanalmente de forma sistemática; los parámetros

medidos fueron longitud de la planta, cantidad de frutos, tamaño (diámetro ecuatorial y polar) y peso de frutos. Se utilizó una balanza Precisa de 650 g (D.S 0.01 g) para medir el peso (g), un vernier Mitutoyo modelo CD-6PSX para medir las longitudes en las primeras semanas, y posteriormente un flexómetro Gripper Contra Impacto 55 M Cinta Truper 14613.

5.4.5 Determinaciones químicas.

Se tomaron muestras de agua semanales para cada uno de los tratamientos en el cultivo acuícola, el estanque de los peces y el reservorio para el riego del cultivo hidropónico. Las determinaciones químicas (nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y fósforo) se llevaron a cabo como se describió en las secciones anteriores.

Con la finalidad de determinar el flujo del nitrógeno y fósforo durante todo el proceso acuapónico se llevaron a cabo determinaciones químicas de estos elementos en los productos finales del cultivo; es decir, el filete de la tilapia, así como los frutos y material vegetativo del jitomate. Las determinaciones se llevaron a cabo como se describe a continuación:

- **Nitrógeno:** de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-F-608-NORMEX-2011, cuyos pasos son los siguientes:
 1. Digestión: Se pesa una cantidad de muestra homogénea adecuada y se coloca dentro de un matraz Kjeldahl junto con el catalizador (mezcla de sulfato de cobre y sulfato de potasio), ácido sulfúrico concentrado y cuerpos de ebullición para la digestión.
 2. Destilación: Una vez obtenido el residuo digerido, éste se deja enfriar y se adiciona agua desionizada, granalla de zinc, solución de hidróxido de

sodio 1:1, y algún agente antiespumante de ser necesario para la destilación. El destilado se recibe en ácido bórico con mezcla de indicadores (rojo de metilo/verde de bromocresol).

3. Titulación: Una vez recolectado el destilado se procede a una titulación ácido-base con un ácido fuerte valorado (ácido clorhídrico 0.1 N en este caso) hasta vire del indicador de verde o azul a ligeramente rojizo, o bien con ayuda de un potenciómetro, previamente calibrado. El punto final de la titulación tiene lugar a pH de 4.6. Además de la muestra se trabaja un blanco de reactivos y un estándar de un aminoácido puro (glicina en este caso).

- **Fósforo:**

El fósforo total se determinó de acuerdo a los métodos de AOAC 965-17 (método espectrofotométrico), el cual consiste en la determinación de una muestra mineralizada, mediante la transformación de sus compuestos fosforados en ortofosforados. La mineralización se realiza por vía seca (calcinación) y posterior disolución en ácido, o bien por digestión ácida. La medida de la absorbancia para esta determinación es a 430 nm del complejo formado con el reactivo nitro-molibdo-vanadato (AOAC, 1990).

5.4.6 Determinaciones bromatológicas.

5.4.6.1 Jitomate.

- Grados brix y pH

Con la finalidad de obtener la determinación de pH y grados Brix, que se refiere a los sólidos solubles totales (generalmente azúcares), se preparó una muestra homogénea del fruto por tratamiento; para ello se licuó el fruto por algunos

minutos para después mezclarse vigorosamente y colocar una alícuota para las lecturas. Para los grados Brix se utilizó un refractómetro digital Pal-1 Profesional Atago 0-53 Brix 3810, se registró la lectura directa como se describe en la NMX-F-112-NORMEX-2010. Para medir el pH se utilizó un medidor de pH, EC y TDS marca Hanna Instruments, modelo HI98130.

- Grado de acidez (acidez titulable)

De la muestra licuada en el punto anteriormente descrito, se tomaron 5 ml y se añadieron 2 gotas de fenolftaleína como indicador. Posteriormente se llevó a cabo la titulación con NaOH 0.1 N hasta observar el vire de color. La acidez titulable es reportada como por ciento de ácido málico, de acuerdo a la NMX-F-102-NORMEX-2010. El cálculo de acidez titulable se llevó a cabo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de acidez} = (V \text{ NaOH})(N \text{ NaOH})(\text{meq ácido málico}) * 100/V \text{ muestra} \quad (19)$$

Donde;

V NaOH = volumen de la solución de NaOH utilizado (ml)

N NaOH = Normalidad de la solución de NaOH

Meq ácido málico = miliequivalentes ácido málico = 0.067

V muestra = volumen de muestra (ml)

5.4.6.2 *Filete de tilapia.*

El análisis proximal del filete de tilapia se llevó a cabo en el Laboratorio de Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. Para la obtención del filete se sacrificó una muestra de

peces por cada tratamiento, se les retiró el filete y se secó hasta obtener su harina. Los análisis se describen a continuación:

- Humedad y cenizas totales: se tomó una muestra de cada una de las harinas de los tratamientos y se registró el peso húmedo de éstas; posteriormente se secaron en una estufa de convección forzada marca Memmert a una temperatura de 100 °C durante 24 horas. Una vez seca la muestra se pesaron nuevamente para determinar el contenido de humedad por diferencia de pesos. Por otro lado, el peso constante se obtuvo secando una hora más la muestra, y se realizó la determinación de cenizas totales incinerando a 500 °C en una mufla marca Felisa durante seis horas. Finalmente se dejaron enfriar las muestras en desecador por dos horas aproximadamente para registrar el peso.
- Grasas y calorías: el análisis de grasas se realizó utilizando una extracción soxhlet asistida con microondas marca Anton Paar, empleando como disolventes hexanos y acetona, para después obtener el contenido de grasas por gravimetría. Las calorías se determinaron según el método isoperibólico, secando la muestra en un horno a 30 °C de temperatura; de esta muestra obtenida se elaboró un pellet de peso entre 0.5 y 1 g que fue incinerado en un calorímetro marca PARR modelo 6200.
- Proteína total: la proteína se determinó de acuerdo a la metodología con acreditación de Entidad Mexicana de Acreditación AC No. A-0376—033/12 (NMX-F-608-NORMEX-2011).
- Carbohidratos totales: las muestras previamente secadas y molidas se sometieron a hidrólisis con HCl, y se colocaron en baño maría por tres horas; posteriormente se centrifugaron y el sobrenadante se conservó para colocarse a baño maría frío y añadir solución de antrona, para reacción por ocho minutos en ebullición. Se realizó una curva de calibración con glucosa

como estándar, y se determinó la concentración a 630 nm en placa con un Multiskan marca Thermo Scientific.

5.5 Determinación de la dinámica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en tres etapas productivas de la tilapia en un sistema acuapónico con jitomate, para establecer la eficiencia entre ambos sistemas.

La proporción del nitrógeno y fósforo asimilados por los peces y las plantas para la producción de biomasa, resultante del aporte total de estos nutrientes por el alimento de los peces, se calculó siguiendo en las siguientes fases del proceso: alimento de los peces, medio acuoso (agua en el sistema), pez (filete, hueso, escamas, órganos), heces de peces y en todos los tejidos de los órganos vegetales (hojas, tallos, raíces y frutos).

5.5.1 Eficiencia en el uso de nitrógeno y fósforo

La eficiencia en el uso de nitrógeno (NUE) y fósforo (PUE) se calculó de acuerdo a Yang y Kim (2020), siguiendo las siguientes fórmulas:

$$NUE = \frac{N_{\text{planta}} + N_{\text{pez}}}{f_N \cdot M_f \cdot T} \quad (20)$$

$$PUE = \frac{P_{\text{planta}} + P_{\text{pez}}}{f_P \cdot M_f \cdot T} \quad (21)$$

En donde f_N y f_P es el contenido de N y P en el alimento del pez (g N/g y g P/g), M_f es la tasa de alimentación (g/día), T es la duración de la producción (días), N_{planta} y P_{planta} son el nitrógeno y fósforo promedio asimilados por las plantas en la cosecha (g), N_{pez} y P_{pez} son el nitrógeno y fósforo promedio asimilados en el pez (g).

5.5.2 Estimación del balance de masa de nitrógeno y fósforo.

Se completó el flujo de nitrógeno y fósforo usando los datos recopilados en el presente estudio, en su mayoría, y datos recopilados en la literatura. La Figura 14 conceptualiza el flujo del nitrógeno y potasio en el sistema acuapónico, derivado de la alimentación de los peces. Para la determinación de N ($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ y TAN) y P ($\text{PO}_4\text{-P}$) en la fase acuosa se tomaron muestras semanales. La determinación en pez y jitomate se llevó a cabo al momento de la producción. Para las heces, se llevó a cabo la recolección de las mismas durante 15 días, con la finalidad de tener la cantidad suficiente de materia seca para su cuantificación.

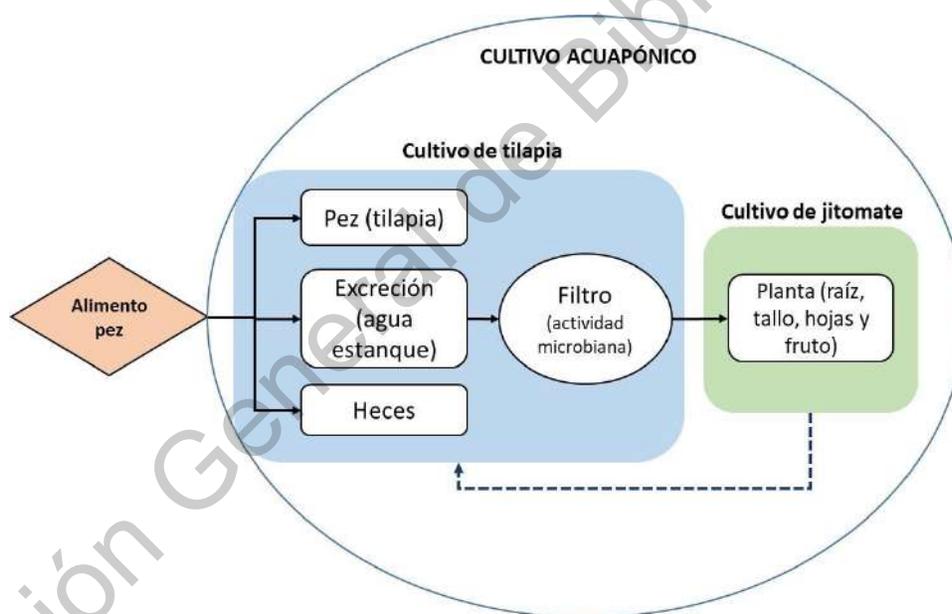


Figura 14. Diagrama conceptual del flujo de nitrógeno y fósforo en el sistema acuapónico.

Se llevó a cabo el cálculo del balance de masa del nitrógeno y fósforo de acuerdo a lo establecido por Wongkiew *et al.* (2017), como se describe a continuación:

Balance de masa de nitrógeno en el sistema acuapónico hiperintensivo

$$f_N \cdot M_f = \frac{d}{dt} (C_{TAN} + C_{NO_2} + C_{NO_3})V + \frac{N_{planta}}{T} + \frac{N_{pez}}{T} + \frac{N_{sedimento}}{T} + \frac{N_{gas}}{T} \quad (22)$$

Balance de masa de fósforo en el sistema acuapónico hiperintensivo

$$f_P \cdot M_f = \frac{d}{dt} (C_{PO_4})V + \frac{P_{planta}}{T} + \frac{P_{pez}}{T} + \frac{P_{sedimento}}{T} + \frac{P_{precip}}{T} \quad (23)$$

Donde f_N y f_P es el contenido de N y P en el alimento para peces (g N / g alimento; g P / g de alimento), respectivamente, M_f es la tasa de alimentación (g / día), C_{TAN} , C_{NO_2} , C_{NO_3} y C_{PO_4} son las concentraciones de TAN, NO_2 -N, NO_3 -N y PO_4 -P en el agua recirculante (g N / L; g P / L), respectivamente, V es el volumen de agua en recirculación (L), N_{planta} y P_{planta} son el N y P promedio asimilados en las plantas en la cosecha (g N; g P), respectivamente, N_{pez} y P_{pez} son el N y P promedio asimilados en carne de pescado, órganos internos, escamas y huesos (g N; g P), respectivamente, T es la duración de la producción (días), $N_{sedimento}$ y $P_{sedimento}$ son N y P en residuos sólidos (heces) (g N; g P), respectivamente, y N_{gas} / T y P_{precip} / T son las tasas de pérdida de N (g N / día) a través de la desnitrificación y la tasa de pérdida de P a través de la precipitación de P orgánico (g P / día), respectivamente (Wongkiew *et al.*, 2017).

5.6 Evaluación del rendimiento del sistema acuapónico en tres etapas productivas de tilapia, a través del flujo de nutrientes.

El rendimiento de sistemas de producción acuapónicos se ve afectado por la diferencia en la tasa específica de crecimiento de los peces y plantas, así como el factor de conversión alimenticia de los peces; y se ve reflejado en los kilos de

producción por unidad de área. Para obtener lo antes señalado, los índices de crecimiento se calcularon con las siguientes ecuaciones (Xiao *et al.*, 2018):

$$\text{Ganancia en peso (AP)} = \text{peso final (g)} - \text{peso inicial (g)} \quad (24)$$

$$\text{Tasa específica de crecimiento (TEC)(\%día)} = 1 + \frac{\text{LN}(\text{peso final(g)}) - \text{LN}(\text{peso inicial(g)})}{\text{Días} \times 100} \quad (25)$$

$$\text{Ingesta de alimento (IA)} = \text{Cantidad total de alimento (g) administrado} \quad (26)$$

$$\text{Factor de conversión alimenticia (FCA)} = \frac{\text{Ingesta total de alimento (g)}}{\text{Ganancia en peso (g)}} + \quad (27)$$

$$\text{Producción} = \text{Biomasa final} - \text{biomasa inicial} \quad (28)$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Producción}}{\text{Área o volumen}} \quad (29)$$

Adicionalmente, se llevó a cabo el cálculo del factor de crecimiento acuapónico (FCA), el cual representa la desviación del mejor crecimiento posible (DMCP), calculado como un cociente (con un DMCP ideal = 1 si la biomasa final de peces y plantas (g) fuera igual) del rendimiento máximo de plantas y peces alcanzado (biomasa en g) durante el experimento, en comparación con dos unidades acuapónicas idénticas. El FAC se describe como el valor absoluto de un número (|x|) y compara el desarrollo de la biomasa directamente. Para el cálculo de FCA, se utilizó la siguiente fórmula (Knaus y Palm, 2016):

$$FCA_{pez} \text{ factor } I = |((\text{Biomasa final de la unidad I}) \times (\text{biomasa final de la unidad II}) - 1) - \text{DMCP}|$$

(30)

$$FCA_{pez} \text{ factor } II = |((\text{Biomasa final de la unidad II}) \times (\text{biomasa final de la unidad I}) - 1) - \text{DMCP}|$$

(31)

$$FCA_{planta} \text{ factor } I = |((\text{Biomasa final de la unidad I}) \times (\text{biomasa final de la unidad II}) - 1) - \text{DMCP}|$$

(32)

$$FCA_{planta} \text{ factor } II = |((\text{Biomasa final de la unidad II}) \times (\text{biomasa final de la unidad I}) - 1) - \text{DMCP}|$$

(33)

Con DMCP = 1

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Densidad de población en el sistema de recirculación acuícola de tilapia (*Oreochromis niloticus*)

Se estableció un sistema de 3 densidades de población y dos condiciones de temperatura en sistemas de recirculación acuícola, por triplicado; por lo que la instalación fue de 18 estanques (Figura 15).



Figura 15. Sistema de recirculación acuícola con tres densidades de población y dos temperaturas para cada densidad.

6.1.1 Condiciones ambientales (control de calidad del agua)

La temperatura y la densidad de población en un cultivo de tilapia son condiciones que pueden afectar el desarrollo de los peces y comprometer la calidad del agua. El registro de la temperatura en el sistema a temperatura ambiente se mantuvo alrededor de los 21.2 ± 0.50 °C durante el día, mientras que en la tarde se registraron valores promedio de 25.2 ± 0.49 °C. Por otro lado, el sistema controlado presentó valores promedio de 26.5 ± 0.55 °C y 30.6 ± 1.0 °C durante el día y la tarde, respectivamente (Figura 16). La temperatura del agua en el sistema no controlado durante el período experimental coincide con García-Trejo *et al.* (2016), quienes reportaron una temperatura promedio de 24.68 ± 3.0 °C bajo las mismas condiciones. Se puede observar que la temperatura en el sistema controlado se mantuvo entre 28-30 °C, lo que corresponde al intervalo de temperatura óptimo para el buen desarrollo de la tilapia de acuerdo a Timmons y Ebeling (2009).

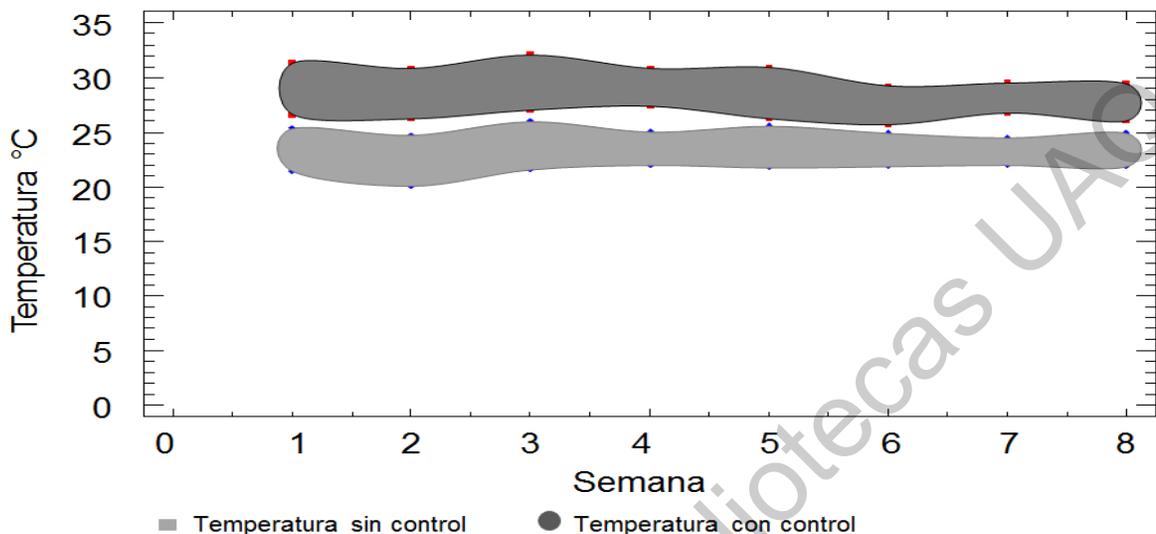


Figura 16. Comportamiento de la temperatura del agua, durante 60 días, en un sistema de recirculación acuícola con y sin control de temperatura.

La importancia de mantener un pH adecuado para los peces se debe a que la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en el agua afecta la respuesta de supervivencia, crecimiento y reproducción en los organismos (White *et al.*, 2013). Los altos niveles de H^+ pueden causar toxicidad y pérdidas iónicas en las células branquiales (Baldisserotto *et al.*, 2014). Chakraborty y Banerjee (2010) informaron que un rango óptimo permisible de pH es de 6.5 a 11.0 para el cultivo de tilapia; mientras que El-Sayed (2006) reportó un rango de 6.5-9 como óptimo para el crecimiento de la mayoría de las especies acuáticas, información que coincidió con Lima *et al.* (2016). Por otro lado, Lee *et al.* (2016) encontraron que la tilapia puede tolerar niveles bajos de pH de 5.5. Con base en la información reportada por otros investigadores se considera que el pH obtenido en el presente estudio (de 7.94 a 9.35) está dentro de los valores óptimos para el buen desarrollo de la tilapia. Con respecto al monitoreo del pH entre los tratamientos se obtuvo que los valores en el sistema a temperatura ambiente fueron de 8.49 ± 0.32 y 8.83 ± 0.19 durante el día y la tarde, respectivamente; mientras que los valores de pH para el sistema

controlado fueron 8.42 ± 0.41 y 9.0 ± 0.23 durante el día y la tarde, respectivamente. Durante el monitoreo de 24 horas, el pH fue más alto en la tarde en comparación con la mañana, y esta tendencia coincidió en ambos tratamientos de temperatura (Figura 17). De acuerdo a los valores obtenidos en todos los tratamientos, se observa que el pH en ningún momento se vio significativamente afectado por la temperatura y la densidad de población del cultivo.

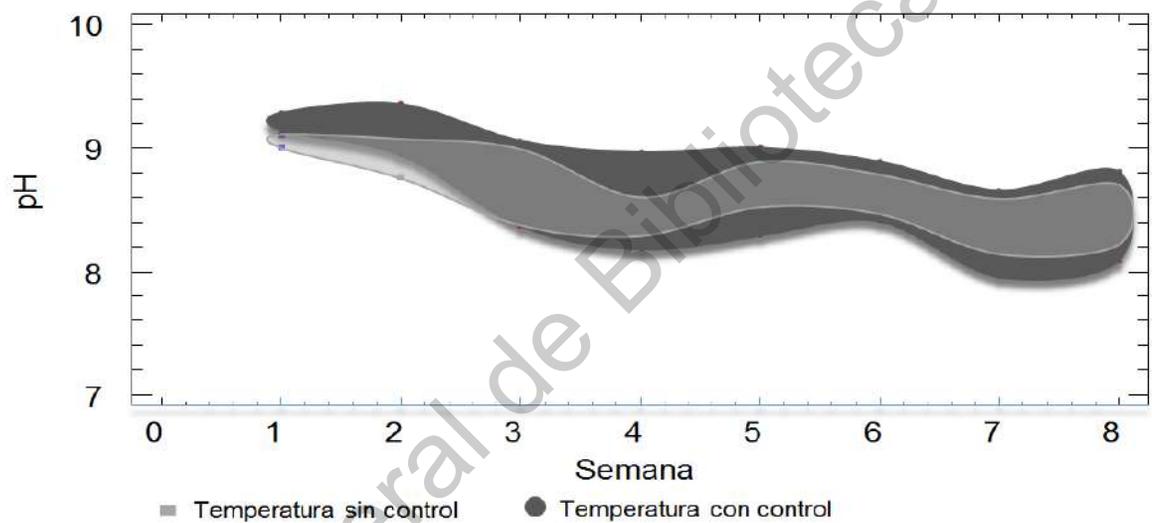


Figura 17. Comportamiento del pH dentro de los tanques durante 60 días en un sistema de recirculación acuícola.

El monitoreo del oxígeno disuelto en el agua durante el período experimental mostró valores de 10.02 ± 1.33 mg/L, y 11.99 ± 1.53 mg/L durante el día y la tarde, respectivamente, en el sistema a temperatura ambiente. Para el sistema con control de temperatura, los valores fueron 6.83 ± 1.33 mg/L y 11.50 ± 2.38 mg/L durante el día y la tarde, respectivamente (Figura 18). El oxígeno disuelto fue uno de los factores más afectados entre los tratamientos, cuyos valores más altos se observaron en la temperatura más baja del agua. Adicionalmente, los valores de oxígeno disuelto fueron más bajos para los tratamientos con mayor densidad de población. La concentración de oxígeno es un elemento limitante en la producción acuícola cuando aumenta la densidad del cultivo (El-Sayed, 2006); es por ello que se han llevado a cabo estudios relacionados con la concentración óptima para el buen desarrollo y crecimiento de la tilapia. Como es el caso de Ebeling *et al.* (2006), quienes reportaron un nivel óptimo de oxígeno disuelto de 5 mg/L para la tilapia, aunque ésta puede vivir en un rango de 3-4 mg/L. De acuerdo a esta información, y a pesar de las diferencias del oxígeno entre tratamientos en el presente estudio, la supervivencia de los organismos nunca se vio comprometida por la ausencia de oxígeno.

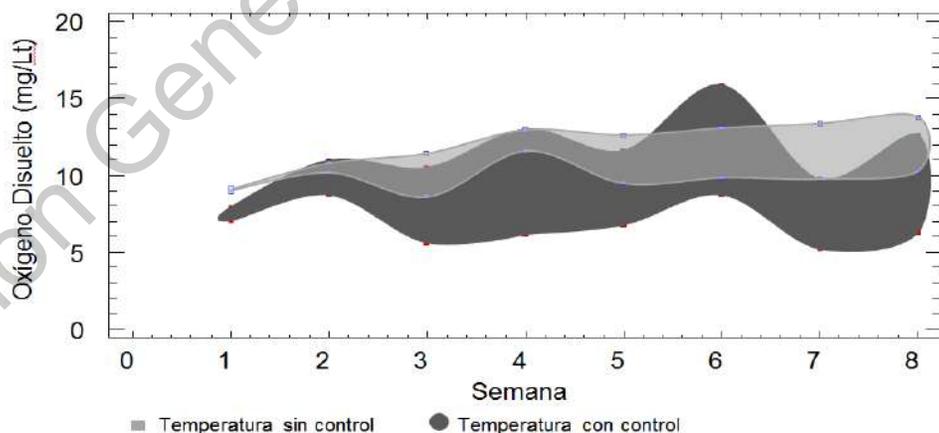


Figura 18. Comportamiento del oxígeno disuelto en el agua dentro de los tanques durante 60 días en un sistema de recirculación acuícola.

Por otro lado, con respecto al monitoreo de las condiciones químicas del agua del cultivo acuícola, al inicio del experimento se realizaron análisis diarios de los compuestos nitrogenados sin recambios de agua; lo anterior con la finalidad de determinar el momento en el que los niveles comprometen la calidad de la misma y, como consecuencia, el desarrollo de los peces. De acuerdo a los resultados obtenidos, los reemplazos de agua tuvieron que realizarse cada 5 días en un 20 % del volumen total.

Durante todo el periodo del experimento se llevaron a cabo muestreos semanales de los compuestos nitrogenados, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 5.5. Se observaron variaciones con valores de 0.103-0.195 mg/L, 4.35-5.9 mg/L y 0.20-0.29 mg/L, para NO_2^- , NO_3^- y NH_3^- respectivamente; lo anterior, para el sistema a temperatura ambiente. Para el sistema con control de temperatura se reportaron valores más bajos (0.024 - 0.28 mg/L, 4.0 - 6.0 mg/L y 0.13 - 0.45 mg/L) para NO_2^- , NO_3^- y NH_3^- , respectivamente.

La densidad de población del cultivo se asocia comúnmente con un aumento en la concentración de compuestos de nitrógeno en el agua, debido a la mayor cantidad de peces almacenados y la consecuente mayor concentración de excretas (Capkin *et al.*, 2010); por lo que se han reportado fluctuaciones en la concentración de compuestos de nitrógeno a lo largo del periodo de cultivo en diferentes investigaciones. García-Trejo *et al.* (2016) reportaron valores de 0.16 a 1.18 mg/L de NO_2 , 3.7 a 5.8 mg/L de NO_3 y 0.8 a 0.9 mg/L de NH_3 en un sistema de recirculación acuícola con tilapia. Los compuestos nitrogenados en el presente estudio se encontraban entre los rangos reportados para la supervivencia y el desarrollo de tilapia para NO_2 , NO_3 y NH_3 (Figura 19) (Azaza *et al.*, 2013; Nunoo y Asase, 2017; Mirea *et al.*, 2013).

En general, de acuerdo a los resultados obtenidos en este experimento se observa que es posible establecer un sistema de cultivo de tilapia con alta densidad, siempre y cuando se tenga un control y manejo adecuado en términos de concentración de los compuestos nitrogenados presentes en el agua; principalmente amoníaco, cuyo compuesto en altas concentraciones es tóxico para la tilapia y puede causar la muerte. Por lo que se puede sugerir que, bajo las condiciones adecuadas, y con un monitoreo constante para conocer el porcentaje y la frecuencia de recambios de agua, es posible llevar a cabo un cultivo altamente denso, 270 ind/m³ para obtener una alta producción; esto último, siempre y cuando los residuos no generen un impacto ambiental negativo de forma considerable.

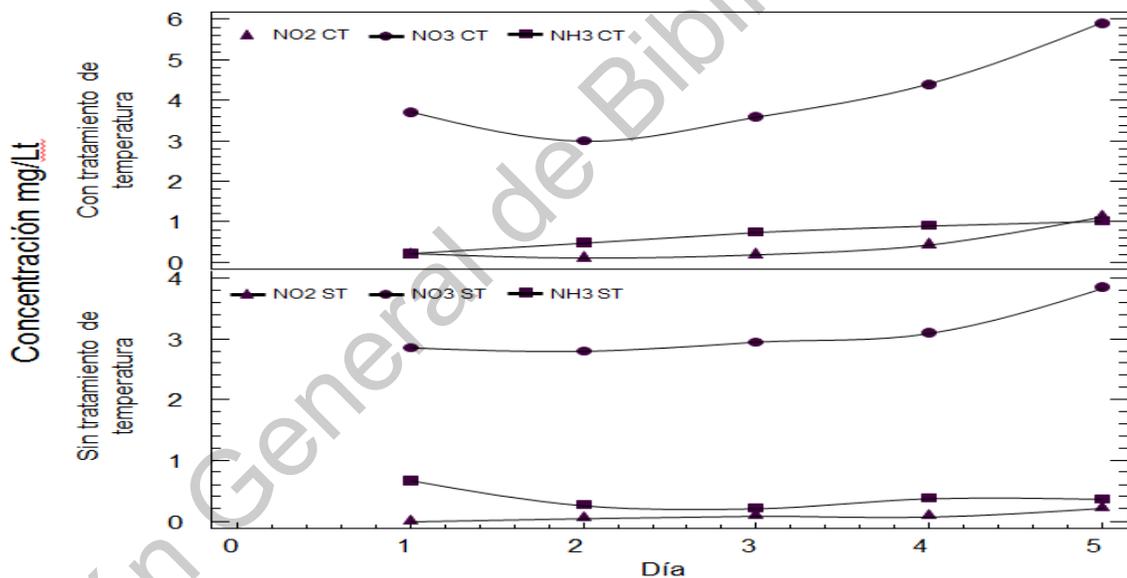


Figura 19. Tendencia de concentración de compuestos de nitrógeno (NO₂⁻, NO₃⁻, NH₃-N) durante cinco días en tratamientos de temperatura en tres densidades durante el experimento.

6.1.2 Estimadores de crecimiento

La Tabla 9 muestra los estimadores de crecimiento de *O. niloticus* en los diferentes tratamientos. No hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el promedio de los pesos y tallas iniciales entre tratamientos; sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre los promedios de pesos y tallas finales. La densidad media (T2) presentó la longitud y el peso máximos, mientras que la alta densidad (T3) mostró el menor. El aumento en peso mostró diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tratamientos con control de temperatura (T1, T2 y T3), comparados con los tratamientos a temperatura ambiente (T4, T5 y T6). Las diferencias en el crecimiento encontradas entre la temperatura y la densidad de población podrían explicarse por el aumento de la competencia por los alimentos y el espacio vital (Huang y Chiu, 1997). El mayor aumento de peso de la tilapia se observó en la densidad promedio (135 peces/m³) con una tasa de crecimiento específica (TCE) de 4.78 ± 0.25 , mientras que la TCE más baja (4.09 ± 0.04) se presentó en la densidad más alta (270 peces/m³). A pesar de que los resultados muestran la menor tasa de crecimiento específica para la mayor densidad de población, los valores indican que se puede obtener un crecimiento adecuado a altas densidades, siempre y cuando se mantengan las condiciones óptimas para el cultivo de estos organismos. Lemos *et al.* (2018) recomendaron que para aumentar la producción es necesario usar densidades medias, debido a que en bajas densidades el espacio está subutilizado, reduciendo su capacidad de producción. No obstante, Gozlan *et al.* (2010) reportaron un mejor crecimiento en su tratamiento con la menor densidad de población, mientras que la producción total y la producción neta exhibieron la tendencia opuesta. Se han llevado a cabo otros trabajos para evaluar la densidad de población en sistemas de recirculación acuícola con tilapia, como Nunoo y Asase (2017) quienes obtuvieron la mayor tasa de crecimiento específico con una densidad de 50 peces/m³. Por otro lado, Mehrim *et al.* (2018) trabajaron con 80 peces/m³ como su alta densidad y encontraron

efectos negativos con una TCE de 0.84 ± 0.01 ; lo que es significativamente menor en comparación con 270 peces/m³ trabajados en el presente estudio como el tratamiento con la mayor densidad de cultivo. Majumder y Kaviraj (2017) reportaron que es mejor trabajar con bajas densidades de población en el cultivo de tilapia; Moniruzzaman (2015) evaluó cuatro densidades de cultivo 50 ind/m³, 75 ind/m³, 100 ind/m³ y 125 ind/m³, y encontró un mayor crecimiento en el tratamiento con la menor densidad (50 ind/m³). Por otro lado, García-Trejo *et al.* (2016) mostraron un mayor crecimiento a una densidad de 90 ind/m³.

Tabla 9. Estimadores de crecimiento de *O. niloticus* para 6 tratamientos de densidad de población y temperatura durante 60 días (media \pm DE)

Estimadores de crecimiento	Tratamiento					
	T1	T4	T2	T5	T3	T6
	Control temperatura	Temperatura ambiente	Control temperatura	Temperatura ambiente	Control temperatura	Temperatura ambiente
Número inicial (n)	20	20	40	40	80	80
Número promedio final (n)	20 ^c	20 ^c	39 \pm 0.5 ^b	39 \pm .10 ^b	79 \pm 1.2 ^a	78 \pm 1.5 ^a
Peso inicial total (g)	33.3 \pm 1.38 ^a	34.4 \pm 0.77 ^a	33.93 \pm 3.53 ^a	33.9 \pm 3.81 ^a	37.71 \pm 4.25 ^a	36.05 \pm 2.60 ^a
Peso final total (g)	574.8 \pm 109.4 ^a	283.9 \pm 44.4 ^{bc}	600.5 \pm 107.8 ^a	288.5 \pm 20.1 ^{bc}	438.0 \pm 48.5 ^{ab}	196.4 \pm 28.5 ^c
Peso promedio individual inicial (g)	1.66 \pm 0.48 ^a	1.72 \pm 0.38 ^a	1.70 \pm 0.38 ^a	1.70 \pm 0.39 ^a	1.89 \pm 0.49 ^a	1.80 \pm 0.43 ^a

Peso promedio inicial total (g)	28.74±9.31 ^a	14.49±4.71 ^c	30.02±12.07 ^a	14.43±5.33 ^c	21.90±7.63 ^b	9.82±2.61 ^c
Ganancia en peso (g)	541.6±108.3 ^a	255.4±43.2 ^{bc}	566.6±105.9 ^a	254.6±19.4 ^{bc}	400.3±44.4 ^{ab}	160.4±26.9 ^c
Tasa específica de crecimiento (%día)	4.73±0.26 ^a	3.54±0.28 ^b	4.78±0.25 ^a	3.57±0.18 ^b	4.09±0.04 ^b	2.82±0.18 ^c
Tasa de supervivencia (%)	100.0±0.0 ^a	100.00±0.0 ^a	98.33±1.44 ^a	97.5±2.5 ^a	98.33±1.44 ^a	97.92±1.91 ^a

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indica que existe una diferencia significativa ($P < 0.05$).

La densidad de población y la temperatura no fueron factores que afectaron la supervivencia de la tilapia en este estudio. No se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) en la tasa de supervivencia de la tilapia entre todos los tratamientos, oscilando entre $97.5\% \pm 2.5$ a 100%. Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron más altos a los reportados por Nunoo y Asase (2017), quienes obtuvieron una tasa de supervivencia entre 88.63% y 81.33%, siendo el valor más bajo para el tratamiento de menor densidad de población. Por otro lado, Lemos *et al.* (2018) obtuvieron tasas de sobrevivencia entre 89 y 100% sin diferencias significativas entre sus densidades, coincidiendo con lo obtenido en el presente estudio.

Con respecto a los tratamientos de temperatura se presentaron diferencias significativas en el crecimiento de los organismos entre los tratamientos con control a 28 °C y el cultivo a temperatura ambiente (por debajo de 26 °C durante el período del experimento). Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con Likongwe *et al.* (1996), quienes reportaron que el crecimiento fue influenciado

significativamente ($P < 0.05$) por la temperatura del agua; cuyas tasas de crecimiento específicas, pesos promedios finales y ganancias porcentuales de peso fueron significativamente ($P < 0.05$) mayores a 28 y 32 °C que a 24 °C. Por otro lado, Al-Asgah y Ali (2007) encontraron diferencias significativas en el crecimiento ($P < 0.05$) de peces cultivados a una temperatura de 29 °C, con respecto a los peces cultivados a 26 °C. Workagegn (2012) mostró el mismo comportamiento de crecimiento en peces que crecieron a 32, 30 y 24 °C, con el mayor crecimiento a la temperatura más alta. Ma *et al.* (2015) concluyeron en su análisis que el peso corporal final de los juveniles criados a 28 °C es mayor que el de los peces criados a 22 o 34 °C; por otro lado, la ingesta de alimento, la eficiencia del alimento y la relación de eficiencia de proteína también fueron mayores a 28 °C. Los datos reportados anteriormente por diferentes investigadores confirman el efecto de la temperatura sobre el crecimiento de la tilapia en cultivo, coincidiendo en un rango de temperatura de 28 y 30 °C para su óptimo desarrollo. Otros estudios sugieren que la temperatura no sólo afecta el crecimiento, sino también la masa muscular y la expresión génica en juveniles de tilapia (Brahmane *et al.*, 2017), por lo que es una variable de suma importancia para controlar en este tipo de cultivos.

6.1.3 Composición bromatológica

Con la finalidad de determinar los efectos que tienen la temperatura y la densidad de población sobre la calidad del filete de la tilapia se llevó a cabo un análisis bromatológico, en el que se determinaron las proteínas, grasas, cenizas y humedad del filete. Los valores para la calidad de la harina de pescado se muestran en la Tabla 10, en donde se pueden observar diferencias entre los tratamientos, con y sin control de temperatura. Los tratamientos con control de temperatura presentaron la mayor cantidad de humedad, el porcentaje más bajo de cenizas, el porcentaje más bajo de grasas y los valores más altos de proteínas. Por otro lado,

no se encontraron diferencias significativas en el análisis bromatológico entre los tratamientos por densidades de población.

Tabla 10. Resultados del análisis bromatológico de *O. niloticus* para 6 tratamientos de densidad y temperatura de población durante 60 días (medios \pm DS)

Parámetros	Tratamiento					
	T1	T4	T2	T5	T3	T6
	Control temperatura	Temperatura ambiente	Control temperatura	Temperatura ambiente	Control temperatura	Temperatura ambiente
Número inicial (N)	20	20	40	40	80	80
Humedad (%)	78.72 \pm 0.25 ^{ab}	77.86 \pm 0.25 ^b	79.04 \pm 0.20 ^a	78.2 \pm 0.26 ^{ab}	78.63 \pm 0.54 ^{ab}	78.19 \pm 0.34 ^{ab}
Cenizas (%)	1.32 \pm 0.004 ^a	1.37 \pm 0.13 ^a	1.29 \pm 0.02 ^a	1.31 \pm 0.14 ^a	1.23 \pm 0.104 ^a	1.41 \pm 0.07 ^a
Lípidos totales (%)	4.50 \pm 0.26 ^d	5.38 \pm 0.38 ^{bc}	4.83 \pm 0.13 ^{cd}	6.33 \pm 0.13 ^a	5.51 \pm 0.05 ^b	5.52 \pm 0.09 ^b
Proteínas (%)	28.71 \pm 1.16 ^a	26.87 \pm 0.25 ^a	26.55 \pm 1.36 ^a	25.48 \pm 3.62 ^a	27.01 \pm 3.17 ^a	25.32 \pm 0.81 ^a

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indica que existe una diferencia significativa ($P < 0.05$).

Los resultados de humedad, cenizas y lípidos concuerdan con los obtenidos por Al-Asgah y Ali (2007), quienes reportaron una mayor cantidad de humedad

(73.3%) y una menor cantidad de lípidos (5.42%) y cenizas (4.25%) en un tratamiento a 29 °C; mientras que la menor cantidad de humedad (72.86%) y la mayor cantidad de lípidos (6.10%) y cenizas (4.48%) se obtuvieron con tratamiento a 23 °C presentando diferencias significativas ($P < 0.05$). En este mismo estudio (Asgah y Ali, 2007), el contenido de proteínas no se vio afectado por el cambio en la temperatura y la densidad de la población ($P > 0.05$). En otro estudio sobre el efecto de la temperatura en la composición nutricional de la carpa (*Cyprinus carpio*), Desai y Singh (2009) reportaron una mayor cantidad de humedad ($73.39 \pm 0.42\%$) y una menor cantidad de lípidos ($10.90 \pm 0.35\%$) en un tratamiento a 32 °C; mientras que la menor cantidad de humedad (73.15%) y la mayor cantidad de lípidos ($12.05 \pm 0.31\%$) se logró con el tratamiento a 28 °C, presentándose diferencias significativas ($P < 0.05$).

Ghozlan *et al.* (2018) reportaron que la composición corporal del pez (% de humedad, proteínas, grasas y cenizas) estaba significativamente ($P \leq 0.01$) influenciada por la densidad de población en bagre, ya que el contenido de humedad fue alto (64.1 %) a baja densidad de población y bajo (62.3%) en su densidad de población más alta. En el mismo estudio, el contenido de proteínas y el contenido de cenizas mostraron la misma tendencia anteriormente señalada. Moniruzzaman (2015) trabajó con 4 densidades de cultivo de tilapia (50, 75, 100 y 125 peces/m³) y encontró que la humedad aumentó a medida que se incrementó la densidad de población (de 69.02 ± 0.26 a 73.57 ± 0.32); en proteínas y cenizas no se mostraron diferencias significativas, y los lípidos fueron mayores en densidades más bajas (de 10.38 ± 0.19 a 6.04 ± 0.27).

En el presente estudio no hubo una influencia considerable de la densidad de población con respecto al porcentaje de proteínas y cenizas. Mientras que los lípidos si fueron influenciados, presentándose el porcentaje más alto en el tratamiento con la densidad media a temperatura ambiente. Por lo antes mencionado, los resultados

mostraron claramente que la composición nutricional de la tilapia se vio afectada por la temperatura del agua, mientras que la densidad de población no fue un factor que afectó significativamente la composición nutricional de los peces.

6.2 Cuantificación de nitrógeno y fósforo en tilapia durante el ciclo de vida del pez, en un cultivo acuícola hiperintensivo, para determinar el flujo de nutrientes.

De acuerdo a los resultados en el experimento previamente descrito, y debido a que la tasa de sobrevivencia fue alta, el crecimiento fue adecuado y la calidad del filete no se vió afectada por la alta densidad de población, se decidió trabajar con la mayor densidad de población para tres etapas productivas de la tilapia, equivalente a 270 peces/m³. Lo antes señalado con la finalidad de determinar la diferencia en el nitrógeno y el fósforo excretados por cada uno de los estadios de desarrollo en altas densidades de cultivo.

6.2.1 Condiciones ambientales

Tomando en consideración los parámetros físicos del agua que generaron los mejores resultados en el experimento anterior, se decidió controlar la temperatura y el oxígeno disuelto para todos los tratamientos. La temperatura se mantuvo alrededor de los 28 °C y el oxígeno disuelto se mantuvo entre 4-6 mg/L para todos los estanques.

6.2.2 Análisis del contenido de nutrientes.

Las determinaciones de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) presentes en las aguas residuales del cultivo hiperintensivo de tilapia, por etapa productiva, se

presentan en su totalidad, así como la concentración de nutrientes excretados por gramo de pez.

Al respecto, la cantidad de nutrientes totales presentes en el agua fue mayor en adultos (Tabla 11); sin embargo, cuando la relación se hizo por gramo de peso del pez, existe una mayor cantidad en la concentración de nutrientes excretados por las crías de peces (Tabla 12).

Tabla 11. Concentración total de nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fósforo) presente en tres etapas productivas bajo un cultivo hiperintensivo de tilapia.

Nutrientes	Excreción total en el agua		
	Crías	Juveniles	Adultos
NH₄⁺ (mg/L)	1.746 ± 0.004 ^a	1.142 ± 0.037 ^b	6.815 ± 0.139 ^c
NO₂-N (mg/L)	0.520 ± 0.014 ^a	1.081 ± 0.081 ^b	1.942 ± 0.083 ^c
NO₃-N (mg/L)	12.689 ± 0.590 ^a	19.182 ± 2.173 ^b	11.804 ± 0.532 ^a
PO₄ (mg/L)	0.33 ± 0.001 ^a	0.99 ± 0.01 ^b	2.466 ± 0.172 ^c

Los valores promedio para cada tratamiento seguidos de un superíndice indican si hay diferencias significativas (P <0.05).

Tabla 12. Concentración de nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato y fósforo) por gramo de pez presente en tres etapas productivas bajo un cultivo hiperintensivo de tilapia.

Nutrientes	Excreción por gramo de pez		
	Crías	Juveniles	Adultos
NH₄⁺ (mg/L)	1.014 ± 0.181 ^a	0.022 ± 0.001 ^b	0.062 ± 0.0006 ^b
NO₂-N (mg/L)	0.302 ± 0.056 ^a	0.020 ± 0.001 ^b	0.017 ± 0.0009 ^c
NO₃-N (mg/L)	7.309 ± 1.247 ^a	0.370 ± 0.039 ^b	0.108 ± 0.002 ^b
PO₄ (mg/L)	0.191 ± 0.033 ^a	0.024 ± 0.004 ^b	0.022 ± 0.001 ^c

Los valores promedio para cada tratamiento seguidos de un superíndice indican si hay diferencias significativas (P <0.05).

En los estudios realizados por otros investigadores sobre el monitoreo de nutrientes derivados de las aguas residuales en la acuicultura se encontró información en la excreción total; sin embargo, en dichos estudios se trabajó con densidades más bajas que las mostradas en el presente estudio. Cao *et al.* (2020) estudiaron alevines de tilapia con un peso promedio inicial de 3.54 ± 2.82 g y una densidad de cultivo de 5.12 ± 0.04 kg/m³; estos investigadores reportaron concentraciones de NH₄⁺-N en RAS inferiores a 2.0 mg/L, NO₂-N inferior a 1.12 mg/L y la concentración máxima de NO₃-N fue 118.4 mg/L. Los valores antes mencionados fueron más bajos que los obtenidos en el presente estudio, debido a las diferencias en la densidad de cultivo, así como también puede influir la diferencia en las condiciones físicas del agua o el tipo y la cantidad de alimentos proporcionados.

Al llevar a cabo un análisis comparativo con otras investigaciones similares se encontró que las concentraciones de nutrientes obtenidas para juveniles (NH₃⁺ -N de 1.142 mg/L, NO₂-N de 1.081 mg/L, NO₃-N de 19.182 mg/L y PO₄ de 0.99 mg/L)

fueron mayores a las reportadas por Obirikorang *et al.* (2019), quienes trabajaron con juveniles de peces con un peso promedio inicial de 27.44 g y con una densidad de población de 3.6 kg/m³; ellos obtuvieron concentraciones más bajas (NH₃ 0.63 mg/L, PO₄ 39 mg/L, NO₃ 2.89 mg/L, NO₂ 0.06 mg/L) que las reportadas en el presente estudio. Lo antes mencionado se explica con la diferencia en la densidad de población que se manejó para ambas investigaciones.

En el tratamiento de adultos de tilapia, el amoníaco presentó niveles altos que podían afectar el desarrollo y la supervivencia de los organismos; por lo que los recambios de agua fueron atendidos para evitar daños a los peces. No hay informes sobre la excreción de nutrientes en la densidad de población manejada en esta investigación. Sin embargo, Gichana *et al.* (2019) reportaron valores más bajos para la excreción de nutrientes del agua residual del cultivo de tilapia que los encontrados en este estudio; dichos valores alcanzaron 2.4 mg/L de NH₃⁺, 2.73 mg/L de NO₃-N, 0.6 mg/L de NO₂-N y 2.65 mg/L de PO₄ para organismos con peso inicial promedio de 110.5 g. Para peces de 160 g se mostraron valores de 0.20 mg/L de NH₄, 0.13 mg/L de NO₂, 0.65 mg/L de NO₃ y 0.09 mg/L de orto fosfato, en una densidad de población de 1 kg/m³ (Moustafa, 2020). Sin embargo, la cantidad de nutrientes excretados en un sistema de producción acuícola depende de la densidad de población del cultivo, el tamaño de los organismos, así como la cantidad y calidad de los alimentos proporcionados, entre otros factores; por esta razón hacer una comparación con otras investigaciones resultó complicado, principalmente por las diferencias con respecto a la densidad del cultivo.

Tomando como referencia lo estipulado por Timmons *et al.* (2002), los nitratos y el fósforo se mantuvieron dentro de los rangos establecidos para el buen desarrollo y crecimiento de la tilapia en cultivo; sin embargo, el amonio y los nitritos excedieron los estándares de referencia (NH₃-N < 1 mg/L, NO₂ < 1 mg/L, NO₃ 0-400 mg/L y fósforo 0.01-3 mg/L). A pesar de ello, los organismos no se vieron afectados

en su crecimiento y sobrevivencia, siempre y cuando se llevaran a cabo recambios parciales para evitar la intoxicación de los peces.

Por otro lado, con la finalidad de conocer la cantidad de nutrientes excretados por gramo de pez en cada una de sus etapas productivas se llevó a cabo un análisis de la concentración del nitrógeno y el fósforo. La concentración por gramo de pez en las tres etapas productivas de tilapia en 24 horas muestra la misma tendencia en todos los nutrientes analizados (Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23). Las crías resultaron con una mayor concentración en la excreción de nitrógeno y fósforo por gramo de pez, seguidos de juveniles y, por último, adultos.

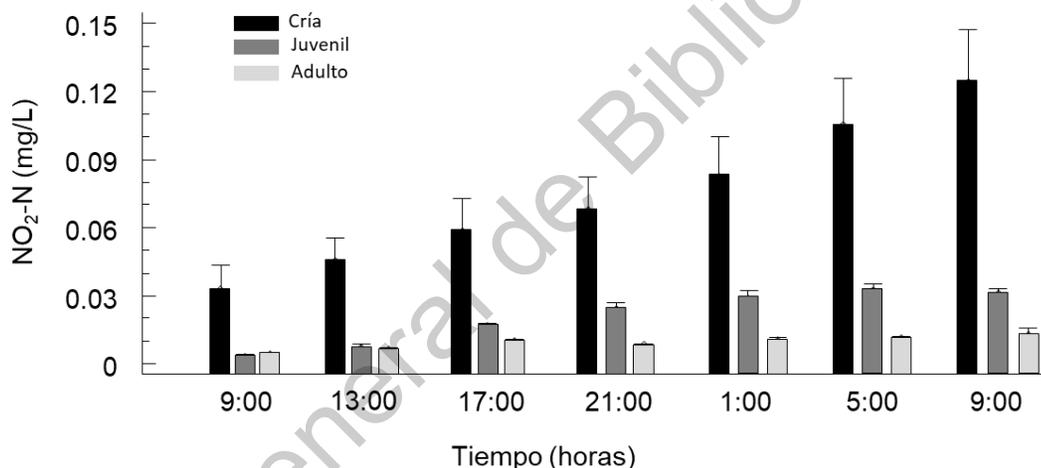


Figura 20. Gráfico de la concentración de NO₂-N por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus* durante 24 horas.

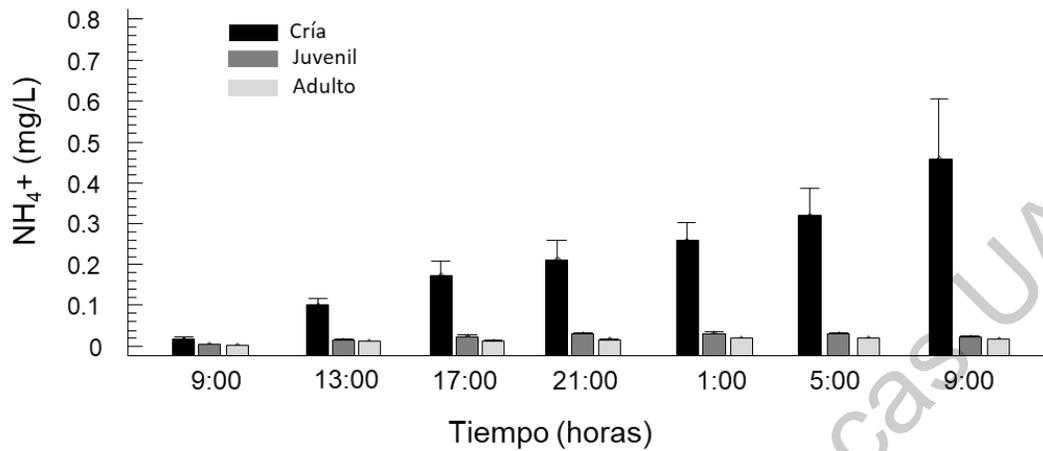


Figura 21. Gráfico de la concentración de NH_4^+ por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus* durante 24 horas.

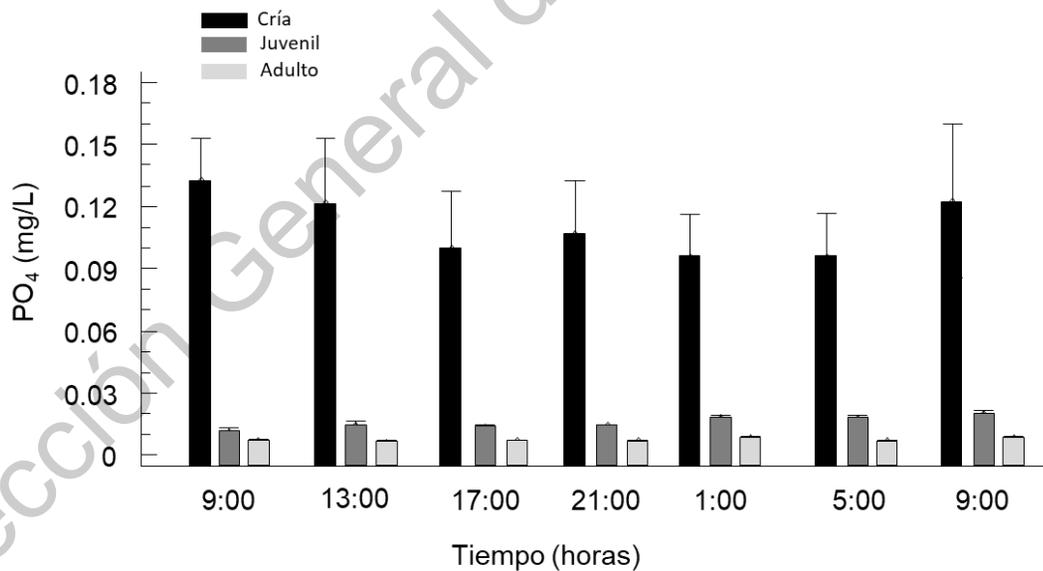


Figura 22. Gráfico de la concentración de PO_4 por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus* durante 24 horas.

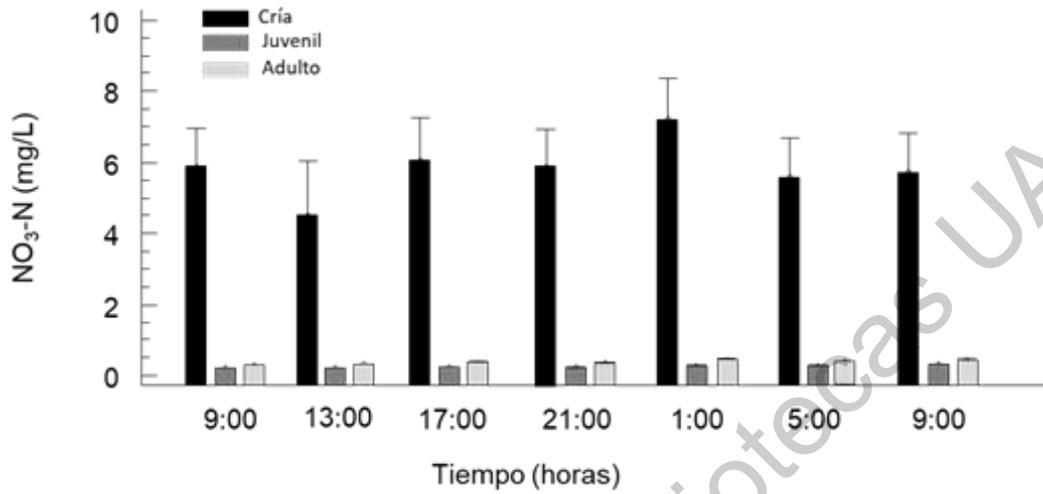


Figura 23. Gráfico de la concentración de NO₃-N por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus* durante 24 horas.

El mismo comportamiento se presentó durante los 60 días de duración del experimento (Figura 24, Figura 25, Figura 27, Figura 26).

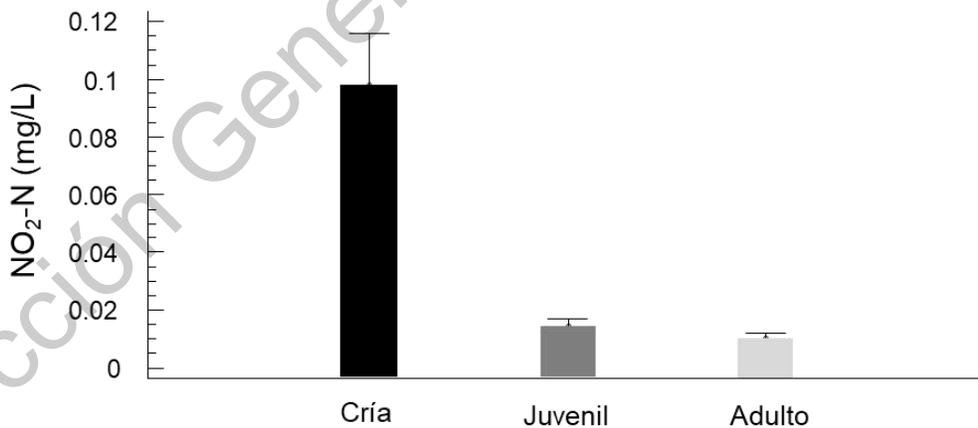


Figura 24. Gráfico del promedio de la concentración de nitritos (NO₂-N) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus*, durante 60 días.

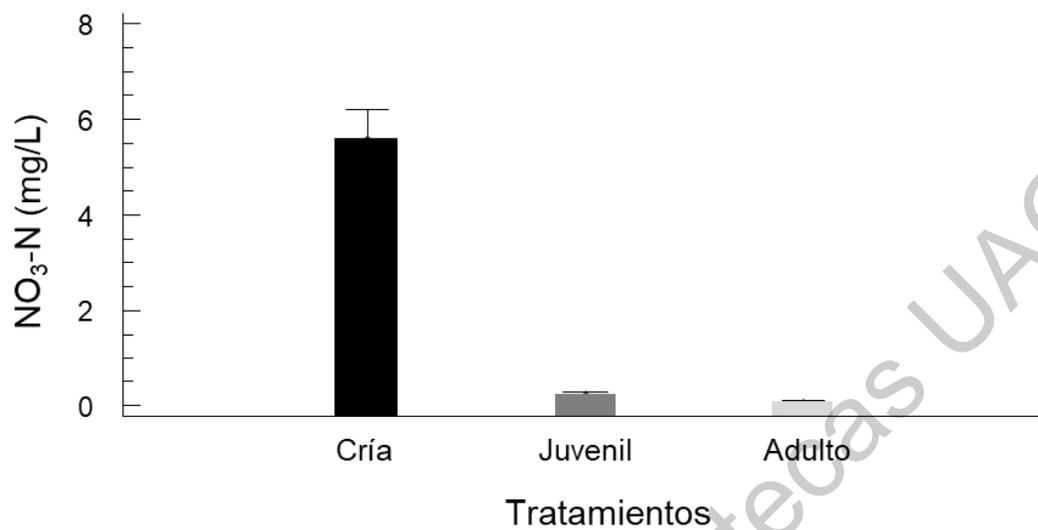


Figura 25. Gráfico del promedio de la concentración de nitratos (NO₃-N) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus*, durante 60 días.

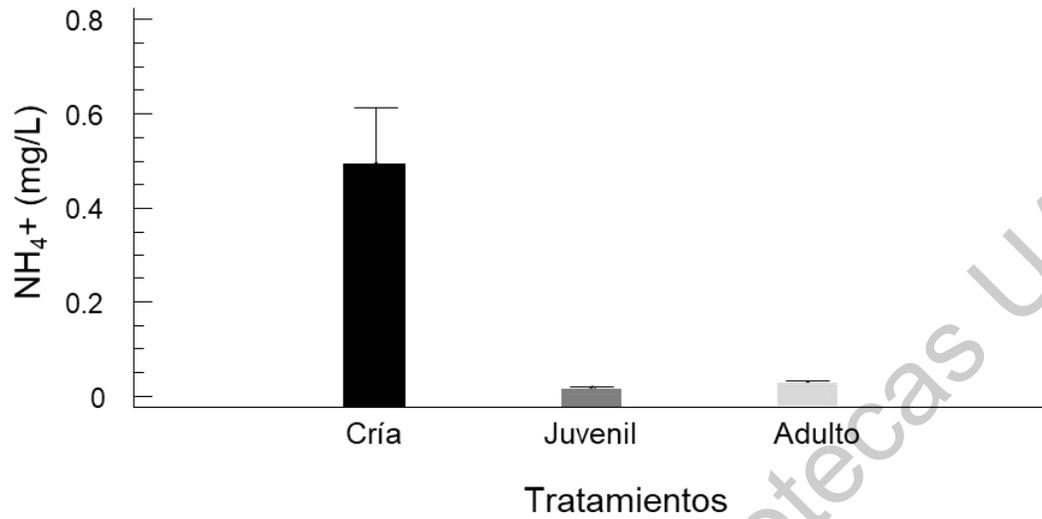


Figura 27. Gráfico del promedio de la concentración de amonio (NH₄⁺) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus*, durante 60 días.

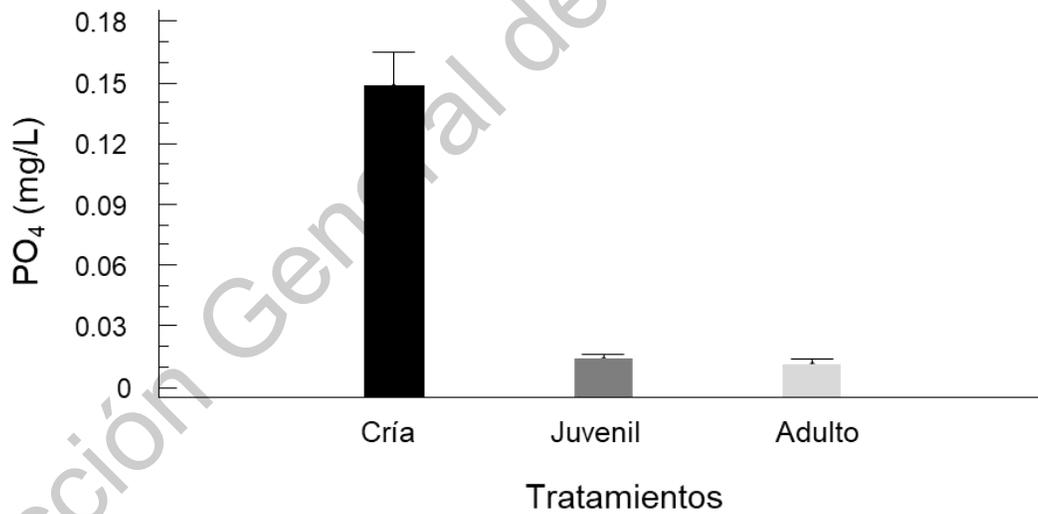


Figura 26. Gráfico del promedio de la concentración de fosfatos (PO₄) por gramo de peso de pez para tres etapas productivas de tilapia *Oreochromis niloticus*, durante 60 días.

La importancia de conocer la concentración de nitrógeno y fósforo en los sistemas de producción acuícola se debe a que son los elementos que generan mayor contaminación en las aguas residuales acuícolas (Hu *et al.*, 2015; Cerozi y Fitzsimmons 2017; Gichana *et al.*, 2019; Cao *et al.*, 2020). Al llevar a cabo un cultivo con una alta densidad de población, aumenta la generación de aguas residuales altamente contaminantes; por lo anterior, es importante conocer el flujo de estos nutrientes en todas las etapas de desarrollo de los peces en producción, a fin de evitar incrementar los efectos negativos provocados por estas prácticas de cultivo. Al conocer el flujo de nutrientes se pueden desarrollar sistemas agrícolas de ambiente controlado (CEA) (Chen *et al.*, 2020), donde los alimentos se producen en una estructura cerrada y en condiciones que permitan la máxima producción de cultivos vegetales y animales, con el máximo rendimiento de recursos; un ejemplo de ello son los sistemas acuapónicos (Gómez *et al.*, 2019). Con la información proporcionada en el presente estudio se aportan datos para la evaluación y comparación del desempeño ambiental del ciclo de vida de la cuna a la tumba (LCA) de los sistemas de producción intensiva (Ghamkhar *et al.*, 2021), con el fin de operar sistemas sostenibles a costo ambiental reducido con alta producción.

6.2.3 Análisis del metabolismo.

La relación O:N es un indicador del sustrato principal que utiliza el organismo aeróbicamente para obtener energía; en esta relación, los valores de 3 a 16 están asociados con el catabolismo protéico, los valores de 16 a 60 están relacionados con el uso combinado de proteínas y lípidos como sustratos, y valores superiores a 60 están asociados con el predominio de los lípidos como recurso energético (Tseng y Hwang, 2008; Barreto-Curiel y Durazo, 2015). En el presente estudio se obtuvo que la relación atómica O:N no presentaba una diferencia significativa entre los tratamientos de cultivo, oscilando entre 20 y 60; esto indica que la tilapia en sus tres etapas productivas, y bajo las condiciones de cultivo establecidas, presentó un

catabolismo combinado de proteínas y lípidos como sustratos para la energía. Los resultados presentados aquí coinciden con los obtenidos por Barreto-Curiel y Durazo (2015) quienes compararon la relación O:N en juveniles de tilapia cultivados en agua dulce y salada, y reportaron un valor de 18.2 ± 5.3 para aquellos cultivados en agua dulce; sin embargo, la densidad de cultivo manejada en la presente investigación fue mayor que el estudio de Barreto, lo que indica que no hay efecto sobre el metabolismo aeróbico con el aumento de la densidad. La diferencia en las etapas no tuvo un efecto significativo sobre el tipo de sustrato metabólico utilizado como fuente principal de energía (Figura 28).

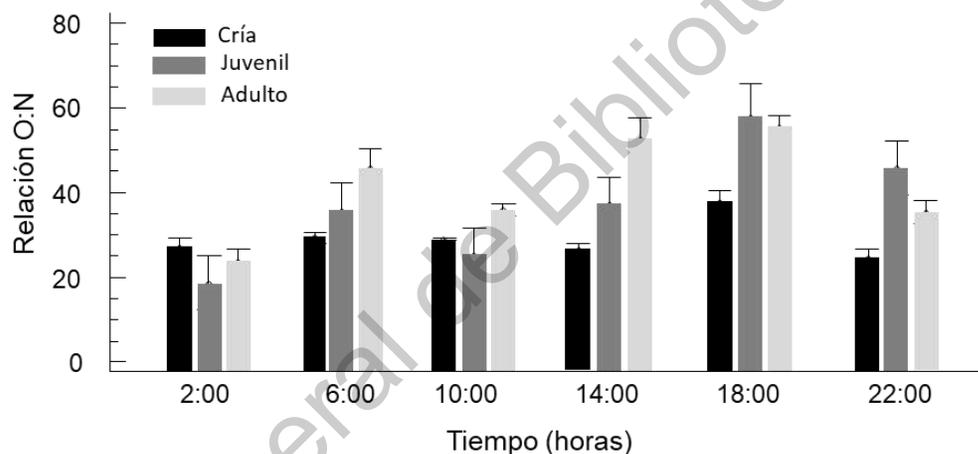


Figura 28. Relación O:N en tres etapas productivas de *Oreochromis niloticus*.

6.2.4 Estimadores de crecimiento

Los estimadores de crecimiento de crías, juveniles y adultos de tilapia en el cultivo hiperintensivo se muestran en la Tabla 13. En general, la densidad de población no afectó la tasa de supervivencia al obtener valores de 97.5%, 100% y 100% para crías, juveniles y adultos, respectivamente. Con respecto a la tasa de crecimiento específica (SGR) se obtuvieron valores similares a estudios realizados con la misma especie, peso similar, pero menor densidad de población. Para las

crías se obtuvo una SGR de 4.54%, valor superior al obtenido en otras investigaciones; Yustiati *et al.* (2019) reportaron un SGR de 2.7% en peces con un peso promedio inicial de 8.75 g. Por otro lado, Rahmat *et al.* (2019) reportaron un SGR de 1.31% de tilapia con un peso promedio de 9 g.

Para los juveniles se obtuvo una SGR de 1.07, ligeramente más baja a lo obtenido por Yong *et al.*, (2018), quienes trabajaron con machos de tilapia con un peso corporal inicial medio de 37 g, una densidad de población de 35 peces/m³ y obtuvieron un SGR de 1.60. Por otro lado, Bowyer *et al.* (2020) trabajaron con organismos con un peso promedio inicial de 36.22 g, una densidad de población de 20 kg/m³ y obtuvieron un SGR de 2.27. Al comparar los datos de los estudios mencionados anteriormente con los obtenidos en el presente estudio se observa que los resultados en otras investigaciones son mayores; no obstante, las densidades de población manejadas en esas investigaciones son menores a las trabajadas en la presente.

Los adultos de tilapia presentaron un valor de 0.70% de tasa de crecimiento específico, siendo comparable con otros estudios con tilapia de tamaño similar; Obirikorang *et al.* (2019) estudiaron tilapia con una masa corporal promedio de 77.9 g y una densidad de población de 74 peces/m³; los autores anteriormente mencionados obtuvieron un SGR de 0.65%. Por otro lado, Osti *et al.* (2018) analizaron tilapias con una masa corporal de 191 g y obtuvieron una SGR de 1.2%, cultivo bajo una densidad de población de 20 peces/m³. Este último estudio reporta un valor mayor al obtenido en el presente estudio; sin embargo, su densidad de población está muy por debajo.

Tabla 13. Estimadores del crecimiento para tres etapas productivas de *Oreochromis niloticus* en un cultivo hiperintensivo (media \pm DE)

Estimadores	Tratamiento		
	Crías	Juveniles	Adultos
Número inicial (n)	240 ^a	240 ^a	240 ^a
Número final (n)	234 ^a	240 ^b	240 ^b
Peso inicial total (g)	107.46 ^a	8,672 ^b	17,512 ^c
Peso final total (g)	1,637.74 ^a	16,480 ^b	26,680 ^c
Peso promedio individual inicial (g)	1.79 ^a	36.13 ^b	72.96 ^c
Peso promedio individual final (g)	27.29 ^a	60.33 ^b	102.83 ^c
Ganancia en peso (g)	1,530.28 ^a	7,808 ^b	9,168 ^c
Ganancia en peso (%)	1,424.04 ^a	90.036 ^b	52.352 ^c
Tasa específica de crecimiento (%día)	4.54 ^a	1.07 ^b	0.70 ^c
Tasa de supervivencia (%)	97.5 ^a	100 ^b	100 ^b

Los valores promedio para cada tratamiento seguidos de un superíndice indican que hay una diferencia significativa ($P < 0.05$).

Por otro lado, la relación talla-peso es un parámetro importante para evaluar el patrón de crecimiento, la salud y el bienestar general de los peces (Asase *et al.*, 2016). Debido a que el análisis de la relación longitud-peso proporciona información indirecta del crecimiento, madurez, nutrición y estado de salud de las poblaciones de peces (Cifuentes *et al.*, 2011) se llevó a cabo el análisis de este factor de

condición en las tres etapas productivas de la tilapia analizadas en el presente estudio.

En crías y juveniles el crecimiento fue isométrico, lo que indica un buen estado fisiológico (Figura 29 y Figura 30). En la mayoría de las investigaciones revisadas sobre la relación peso-longitud de *O. niloticus* bajo diferentes condiciones, el crecimiento es isométrico, confirmando que la tilapia es una especie adaptable a diferentes condiciones. M. Gullian-Klanian (2013) trabajó con diferentes densidades de población de alevines de tilapia, y obtuvo un coeficiente de regresión (b) de 3.168 para sus densidades de población más altas que fueron 1.22 kg/m³. Por otro lado, Nonoo y Anani (2016) trabajaron con juveniles de tilapia con un peso medio inicial de 22.8 ± 2.1 g y una densidad de 2 peces/m² reportando un coeficiente de regresión (b) de 3.1.

Con respecto a los adultos (Figura 31) no ha habido resultados tan favorables como con los estudios realizados con crías y juveniles. Tal es el caso de Malik *et al.* (2017) quienes estudiaron machos y hembras de tilapia, las hembras con un peso promedio de 133.9 ± 15.6 g y los machos con un peso promedio de 143.42 ± 11.4 g; ellos obtuvieron valores de "b" de 1.20 para las hembras y 1.36 para los machos. Además, Ondhoro *et al.* (2019) estudiaron adultos de tilapia de 153 g, reportando alometría positiva con valores de b de 3.3. Con respecto al presente estudio, se obtuvo un valor de "b" de 2.75, indicando un crecimiento alométrico negativo, lo que significa que la longitud aumenta más que el peso ($b > 3$). A pesar de que los adultos presentaron una ligera alometría negativa, se considera que está dentro del rango aceptable de peces con buena salud fisiológica, dado que los valores isométricos en crecimiento de los peces fluctúan dentro de los valores $b = 2.5$ y $b = 3.5$, de acuerdo a lo reportado por Froese (2006).

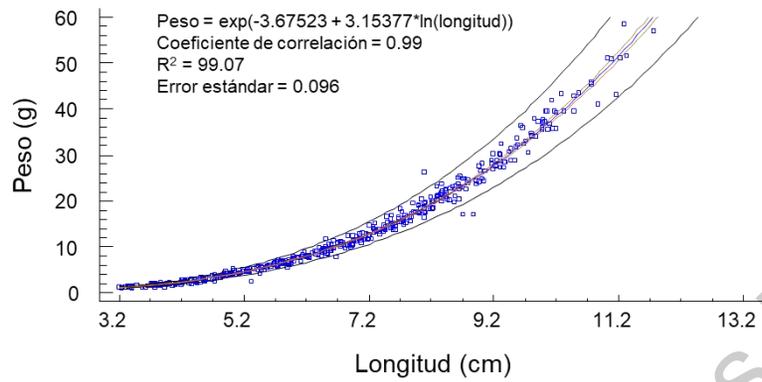


Figura 29. Gráfico de la relación talla-peso en crías de *O. niloticus* bajo un sistema hiperintensivo de recirculación acuícola.

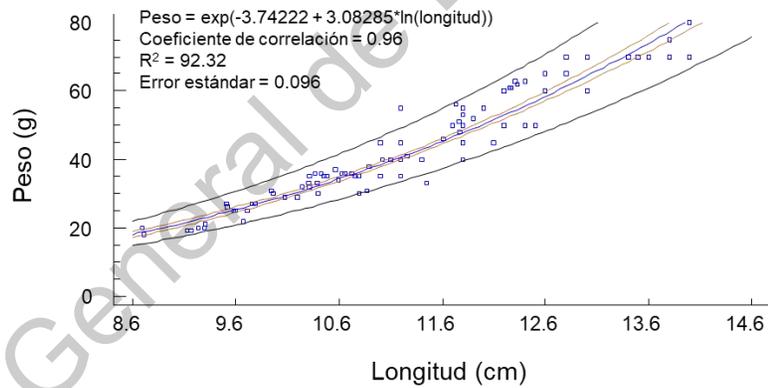


Figura 30. Gráfico de la relación talla-peso en juveniles de *O. niloticus* bajo un sistema hiperintensivo de recirculación acuícola.

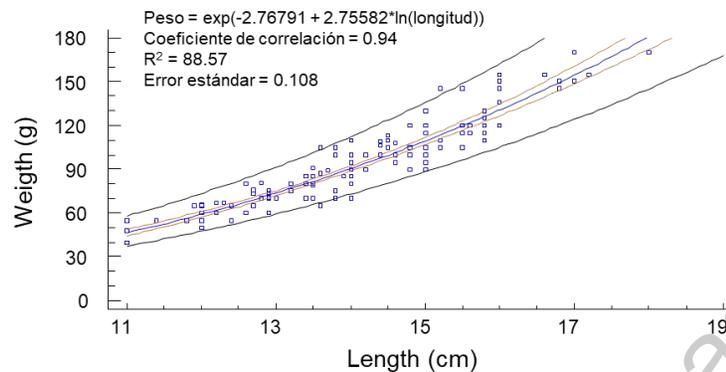


Figura 31. Gráfico de la relación talla-peso en adulto de *O. niloticus* bajo un sistema hiperintensivo de recirculación acuícola.

6.3 Evaluación del cultivo acuapónico entre tilapia y jitomate.

6.3.1 Control de calidad del agua

El registro de la temperatura en los estanques del cultivo de la tilapia para todos los tratamientos permaneció entre 24 y 30 °C, el cual fue controlado por resistencias eléctricas de inmersión (Figura 32). La activación de dichas resistencias de agua se dio por las madrugadas, momento en el que la temperatura baja de manera drástica en el sitio de estudio; lo anterior a fin de proporcionar condiciones óptimas para el desarrollo de los peces de acuerdo al rango de temperatura óptima señalado por Ebeling *et al.* (2006). El comportamiento de la temperatura en los reservorios para riego del cultivo vegetal estuvo alrededor de los 23 °C para todos los tratamientos (Figura 33). La temperatura de la zona de la raíz es un factor que influye en el desarrollo de las raíces, así como la absorción del agua e iones; es por ello que se han hecho estudios al respecto (Hosseinzadeh, 2017; Antonilos, 2020; Patil *et al.*, 2020), los cuales han demostrado que el crecimiento de las plantas es muy influenciado por la temperatura de las raíces, por lo que la temperatura del

agua de riego juega un papel importante para el desarrollo del cultivo vegetal. Algunos autores indican que temperaturas por encima de los 20 °C conducen a un buen crecimiento vegetativo; sin embargo, Falah *et al* (2010) obtuvieron sus mejores resultados en el crecimiento de jitomate a 35 °C. De acuerdo a lo previamente mencionado, y a lo reportado por Resh (2012), la temperatura del agua de riego en todos los tratamientos se mantuvo dentro del intervalo adecuado para el crecimiento de la planta; no obstante, se pudieran mejorar las condiciones del crecimiento si se logra aumentar la temperatura del agua de riego y mantenerla en las condiciones óptimas.

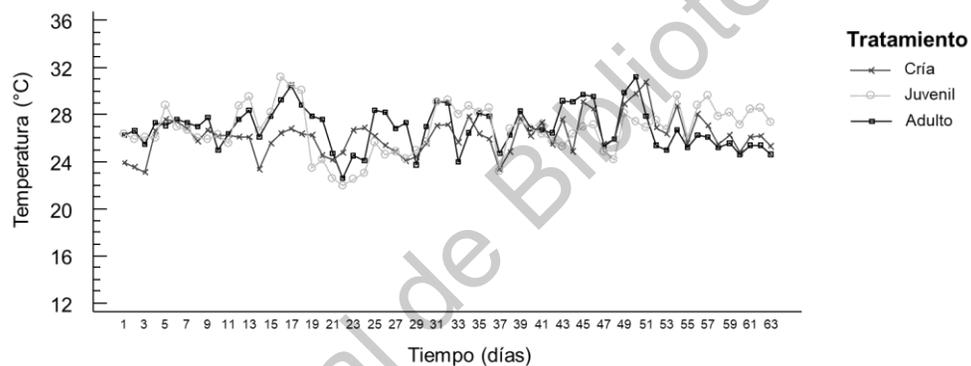


Figura 32. Comportamiento de la temperatura del agua en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto).

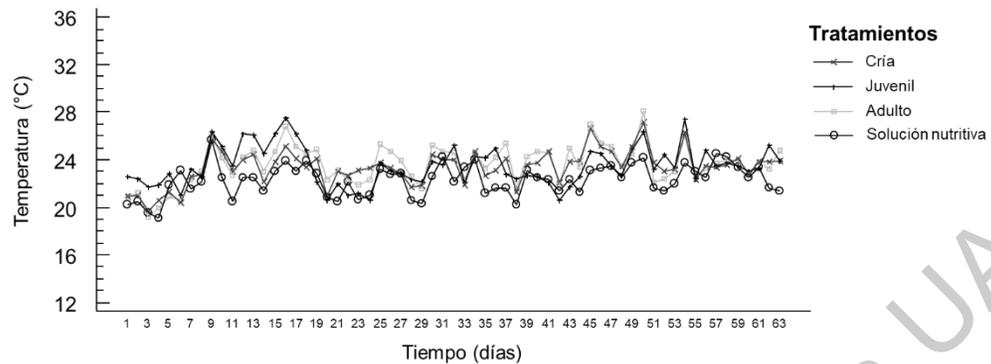


Figura 33. Comportamiento de la temperatura del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.

El pH es uno de los factores cruciales en acuaponía. Para el cultivo de peces, el pH del agua es un factor que influye en la respuesta al estrés y desarrollo de los peces; es así que la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en el agua podría afectar la supervivencia y el crecimiento de los organismos acuáticos (White *et al.*, 2014). De acuerdo con El-Sherif y El-Feky (2009), el rango óptimo de pH del agua para la cría de tilapia (*O. niloticus*) está entre 7 y 8; no obstante, estudios recientes reportan valores menores para el óptimo desarrollo y crecimiento de esta especie (Nobre *et al.*, 2014; Rebouças *et al.*, 2015).

Por otro lado, y con respecto al cultivo vegetal, Patil *et al.* (2020) mencionan que la regulación de pH conduce a un mayor rendimiento y calidad del producto, siendo el pH recomendado para la agricultura hidropónica entre los 5.5-6.5; lo anterior, debido a que la disponibilidad de los nutrientes se optimiza a pH ligeramente ácido.

En este estudio se registró un rango de pH entre 7 y 9, cuyos valores son aceptables para el cultivo de tilapia (Figura 34) de acuerdo a lo reportado por El-

Sherif y El-Feky (2009), además de que en producción acuícola se mantienen niveles de pH entre 7-8.5, lo que favorece la nitrificación en los biofiltros; por lo tanto, permite convertir el NH_3 que es tóxico a NO_3 (Blanchard *et al.*, 2020). No obstante, los niveles de pH no son los adecuados para el crecimiento de tomate en hidroponía (Figura 35) (Patil *et al.*, 2020). A pesar de lo anterior, se decidió no realizar ajustes de pH al sistema con la finalidad de evaluar el desarrollo de ambas especies cultivadas sin la adición de agentes externos.

Como se mencionaba anteriormente, el pH estuvo por encima del intervalo óptimo para el cultivo de jitomate (5.5-6.5), lo que pudo afectar su crecimiento. Se reporta que con valores superiores a 7, la disponibilidad de hierro (Fe), magnesio (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y fósforo (P) se ve afectada (Hosseinzadeh *et al.*, 2017); por lo que el alto pH registrado pudo provocar que la planta perdiera su capacidad para absorber algunos de los elementos esenciales para un crecimiento saludable. Con respecto a los macronutrientes (NP) que son el objeto del presente estudio, la mayor asimilación y el mayor efecto del medio radicular sobre la disponibilidad esencial se encuentra entre 5.5 a 7.5 (Resh, 2015); estos valores se encuentran por debajo de lo obtenido. Por lo antes señalado, se suponen mejores resultados en la producción en caso de llevar a cabo ajustes en este factor, manteniendo el pH del agua de riego en un nivel que favorezca la producción de pescado y la nitrificación, sin afectar significativamente la producción de las plantas; conciliando ambos sistemas a un pH de 7 (Tyson *et al.*, 2007).

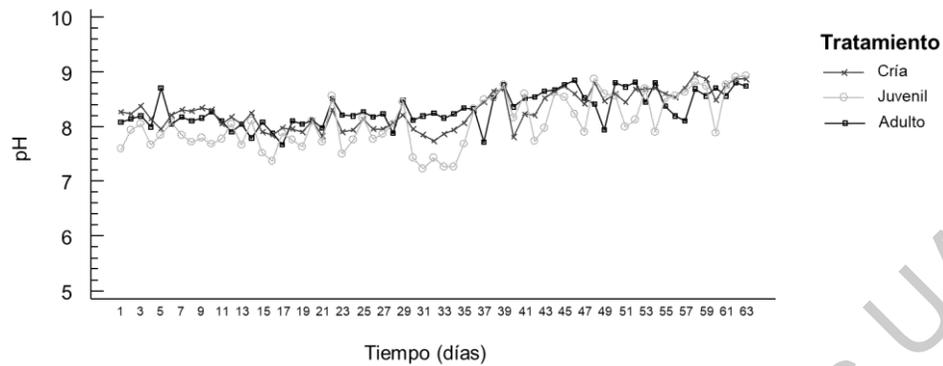


Figura 34. Comportamiento del pH del agua en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto).

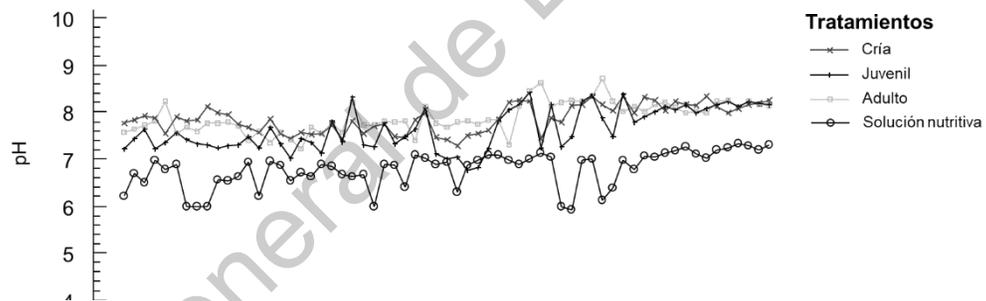


Figura 35. Comportamiento del pH del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.

El oxígeno disuelto es uno de los factores más importantes para la supervivencia de los peces, especialmente en un sistema acuícola hiperintensivo por la cantidad de organismos cultivados; es por ello que la concentración de oxígeno disuelto fue controlada y mantenida entre 5 y 7 mg/L en los estanques acuícolas, con la finalidad de evitar altas tasas de mortalidad (Figura 36). Con

relación al control que se tuvo en este aspecto, y los datos registrados durante el monitoreo del oxígeno disuelto, la tilapia en este estudio nunca se vio comprometida por la ausencia de oxígeno.

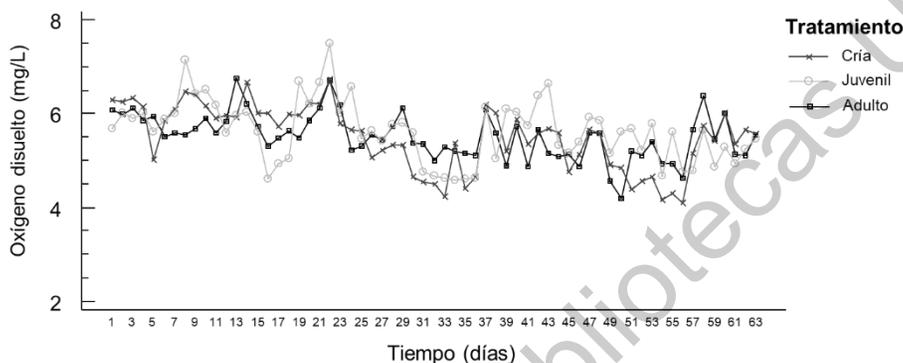


Figura 36. Comportamiento del oxígeno disuelto en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto).

Por otro lado, en los reservorios a los que se dirigía el agua de los estanques acuícolas, así como el reservorio con la solución nutritiva, cuya agua era utilizada para el riego del cultivo del jitomate, se registraron valores más bajos que en los estanques acuícolas (Figura 37). A pesar de que la planta no requiere de la misma concentración de oxígeno disuelto que los peces, sí es un factor importante para el desarrollo del jitomate; esto debido principalmente a que un déficit de oxígeno en la solución recirculante reduce la permeabilidad de las raíces, y limita la absorción de agua y nutrientes, con efectos negativos en el rendimiento de los cultivos crecidos en sistemas sin suelo. La mayoría de las plantas requieren por lo menos de 3 mg/L de oxígeno disuelto en el agua de riego; con niveles más bajos, las plantas pueden presentar pudrición de raíces (FAO, 2014). La deficiencia de oxígeno en las raíces de plantas cultivadas sin suelo provocan un rendimiento deficiente de las raíces y la

planta, y un aumento en la incidencia de plagas y enfermedades (Al-Rawahy *et al.*, 2019). El tratamiento con la solución nutritiva se mantuvo en un rango de entre 3 y 5 mg/L de oxígeno disuelto; sin embargo, los tratamientos acuapónicos presentaron niveles bajos que oscilaron entre 1 y 3 mg/L de oxígeno disuelto. Esta condición pudo afectar el crecimiento y producción del jitomate, al no permitir la correcta asimilación de nutrientes por las raíces de la planta.

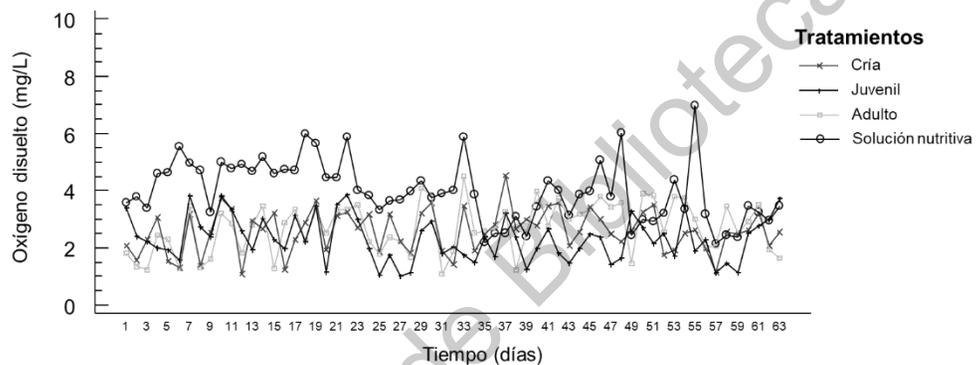


Figura 37. Comportamiento del oxígeno disuelto del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.

La conductividad eléctrica es un índice de la concentración de sal y un indicador de la concentración de electrolitos en el agua de riego, y está relacionada con la cantidad de iones disponibles para las plantas en la zona de las raíces (Ding *et al.*, 2018). La conductividad eléctrica mide la salinidad o la electricidad que pasa a través del agua de riego, y usualmente se mide en micro o mili Simens por centímetro. En el presente estudio hubo una fluctuación en la conductividad entre 0.4 y 0.9 mS, la tendencia fue la misma entre tratamientos (Figura 38).

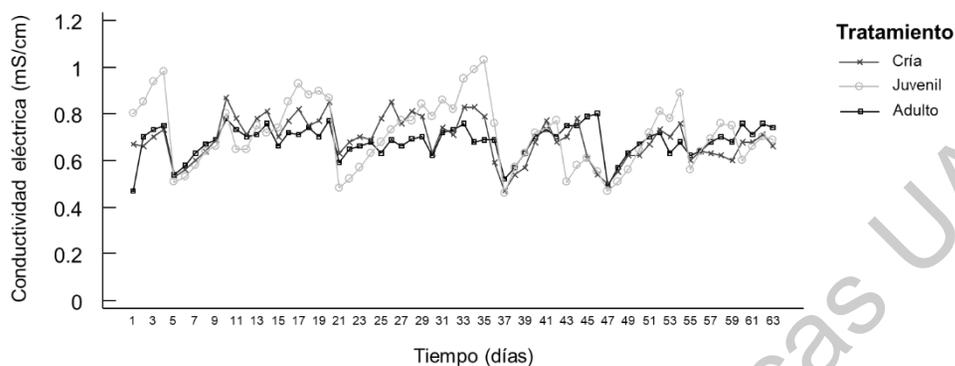


Figura 38. Comportamiento de la conductividad eléctrica del agua en los estanques de recirculación acuícola de cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto).

Con respecto al agua de los reservorios para el riego de jitomate se presentaron diferencias significativas entre la conductividad eléctrica de la solución nutritiva del cultivo hidropónico; ésta tenía valores de alrededor de 2 mS, con respecto a la conductividad presente en los cultivos con riego acuícola con valores menores a 1 mS en los tres tratamientos (Figura 39). En el agua de cultivos hidropónicos, una conductividad eléctrica alta dificulta la absorción de nutrientes; por lo que existe un desperdicio de los mismos y aumenta la contaminación debido a la descarga de estas aguas cargadas de nutrientes. Por otro lado, niveles de CE bajos pueden afectar el crecimiento y rendimiento de las plantas (Signore *et al.*, 2016).

En otros estudios llevados a cabo se demostró que niveles de conductividad eléctrica altos (4.5 mS/cm) en cultivos hidropónicos de jitomate tienen mejor crecimiento. Diversas investigaciones manejan niveles de CE entre 4-5 mS/cm para cultivos hidropónicos de jitomate, los cuales son alimentados con soluciones

nutritivas especializadas (Urrestarazu *et al.*, 2015). Sin embargo, los valores obtenidos en este estudio coincidieron con los reportados por Ngo *et al.* (2017) con valores entre 0.3 y 0.55 mS para un cultivo acuapónico con riego proveniente del cultivo de peces.

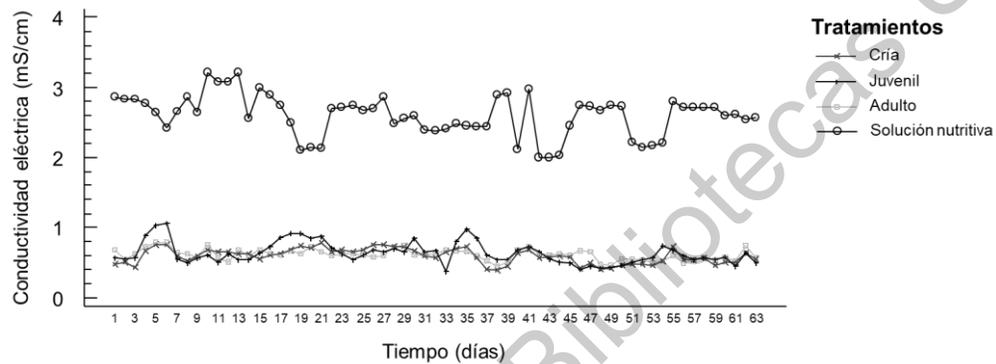


Figura 39. Comportamiento de la conductividad eléctrica del agua en los reservorios para riego al cultivo de jitomate provenientes del cultivo de tilapia en tres etapas productivas (cría, juvenil y adulto) y solución nutritiva para el cultivo hidropónico.

Las condiciones físicas del agua en un sistema acuapónico son indispensables para el buen desarrollo y producción de los cultivos vegetales y animales. En la Tabla 14 se muestran los parámetros monitoreados en el agua del sistema acuapónicos para los diferentes tratamientos.

Tabla 14. Monitoreo de las condiciones físicas del agua en los estanques de recirculación acuícola del cultivo de tilapia en tres etapas reproductivas y reservorios para riego al cultivo de jitomate en los diferentes tratamientos.

Tratamientos	Conductividad		pH		Temperatura		Oxígeno disuelto	
	Estanque	Reservorio	Estanque	Reservorio	Estanque	Reservorio	Estanque	Reservorio
Cría	0.69±0.08 ^{ab}	0.59±0.10 ^a	8.29±0.33 ^a	7.86±0.29 ^a	26.86±1.8 ^a	23.36±1.46 ^a	5.49±0.67 ^a	2.54±0.70 ^{ab}
Juvenil	0.72±0.13 ^a	0.63±0.16 ^a	8.07±0.46 ^b	7.64±0.44 ^b	26.75±1.5 ^{ab}	23.5±1.66 ^a	5.57±0.50 ^a	2.31±0.77 ^a
Adulto	0.68±0.07 ^b	0.61±0.078 ^a	8.31±0.3 ^a	7.89±0.32 ^a	26.86±1.8 ^b	23.61±1.71 ^a	5.51±0.49 ^a	2.70±0.88 ^b
Solución nutritiva	NA	2.60±0.29 ^b	NA	6.79±0.36 ^c	NA	22.29±1.33 ^b	NA	3.94±1.00 ^c

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indican que existe una diferencia significativa ($P < 0.05$).

6.3.2 Crecimiento

La Tabla 15 muestra los estimadores de crecimiento de crías, juveniles y adultos de tilapia en un cultivo acuapónico hiperintensivo. Se registran valores de supervivencia superiores al 90% (93.8% para crías 94.3% para juveniles y 91.6% para adultos). Con respecto a la tasa de crecimiento específica (SGR), los valores obtenidos estuvieron dentro de lo esperado; los valores más altos fueron para crías (3.01) (Figura 41), seguidos de juveniles (1.40) (Figura 40), y el SGR más bajo fue para adultos (0.65) (Figura 42). Todos los valores obtenidos fueron similares a los obtenidos por otras investigaciones con tilapia de tamaños similares, pero las densidades de población más bajas. Para las crías, otros autores obtuvieron una

SGR más baja que la obtenida en el presente estudio; Yustiati *et al.* (2019) reportaron una SGR de 2.7% en tilapia con un peso promedio inicial de 8.75 g. Por otro lado, Rahmat *et al.* (2019) mostraron una SGR de 1.31% de tilapia con un peso inicial promedio de 9 g. Para los juveniles, el SGR fue similar a los obtenidos en otras investigaciones, como la llevada a cabo por Yong *et al.* (2018), quienes reportaron un SGR de 1.60 para juveniles de 37 g y Bowyer *et al.* (2020) con una SGR de 2.2. Cabe señalar que los estudios previamente citados trabajaron con densidades entre 20 y 30 kg/m³ en comparación con 80 kg/m³ del presente estudio. Por otro lado, la SGR de adultos de tilapia (0.65) coincidió con Obirikorang *et al.* (2019) quienes obtuvieron un valor de 0.65 de SGR en tilapias de 78 g.

Con respecto al factor de conversión alimenticia, que se refiere a la proporción de la alimentación total suministrada dividida por la biomasa total recolectada (Mengistu *et al.*, 2020), los valores obtenidos son comparables con otras investigaciones; como es el caso de Al Tawaha *et al.* (2021) quienes reportan un factor de 1.27 para juveniles de tilapia cultivados a una densidad de 12 kg/m³. Por otro lado, Thoa *et al.* (2016) reportaron valores de 1.08 en ambientes de agua dulce.

Tabla 15. Estimadores de crecimiento para tres etapas productivas de *Oreochromis niloticus* en un sistema acuapónico hiperintensivo.

Estimadores de crecimiento	Experimento edades		
	Alevín	Juvenil	Adulto
Número inicial de organismos	420	140	60
Número final de organismos	394	132	55
Peso promedio individual inicial (g)	3.64±1.38	62.00±6.77	196.32±40.85

Peso promedio individual final (g)	43.25±9.04	201.17±30.41	359.00±74.21
Peso inicial total (g)	1,528.80±57.9	8,680.00±94.7	11,779.20±24.5
Peso final total (g)	17,040.50±350.6	26,554.44±403.14	19,745.00±401.81
Ganancia en peso (g)	15,511.70	17,874.44	7,965.80
Ganancia en peso (%)	1,014.63	205.93	67.63
Tasa específica de crecimiento (TEC, % día)	3.01	1.40	0.65
Tasa de supervivencia (TS, %)	93.81	94.29	91.67
Factor de conversión alimenticia	1.96	1.65	1.76
Pez cosechado (kg/m ³)	68.16	106.22	78.98

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indican que existe una diferencia significativa (P<0.05).

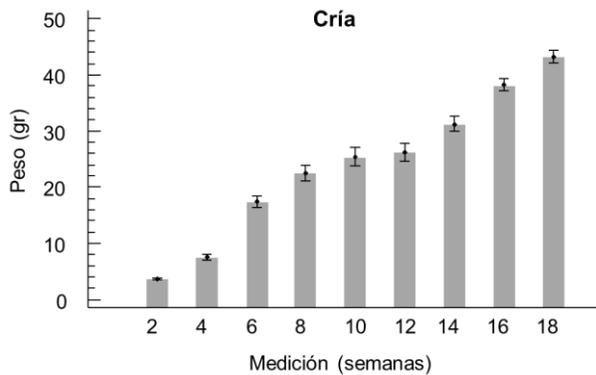


Figura 41. Gráfica del crecimiento en crías de tilapia en un sistema acuapónico hiperintensivo.

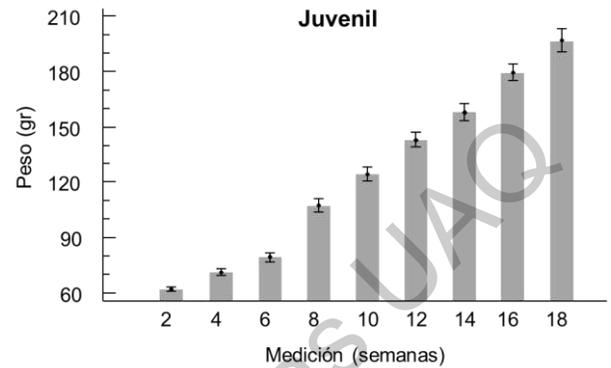


Figura 40. Gráfica del crecimiento en juveniles de tilapia en un sistema acuapónico hiperintensivo.

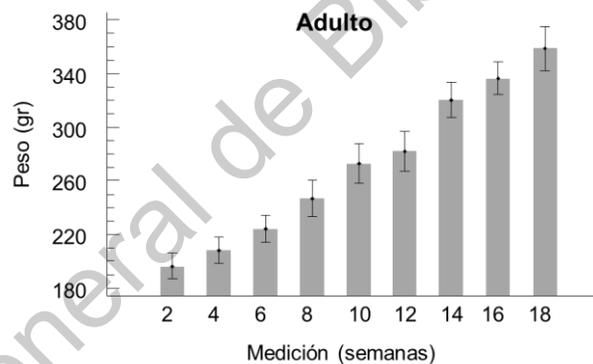


Figura 42. Gráfica del crecimiento en adultos de tilapia en un sistema acuapónico hiperintensivo.

La importancia de analizar esta relación al principio y al final del experimento se debe al hecho de que se debe asegurar que los peces ingresen al sistema con buena salud, y que la hiperdensidad y la recirculación en el sistema acuapónico no estén afectando el buen desarrollo del organismo. Los valores obtenidos de b para las tres etapas productivas durante este experimento tendieron a un crecimiento isométrico (entre 2.85 a 3.25) (Figura 43, Figura 44, Figura 45), considerando que

las especies isométricas en crecimiento son las que fluctúan dentro de los valores $b = 2.5$ y $b = 3.5$ (Froese, 2006), lo que indica un buen estado fisiológico. Datos comparables con otros estudios realizados con la misma especie y en RAS, reportan valores de 3.168 (Gullian-Klanian, 2013), 3.1 (Nonoo y Anani, 2016), 3.3 (Ondhoro *et al.*, 2019).

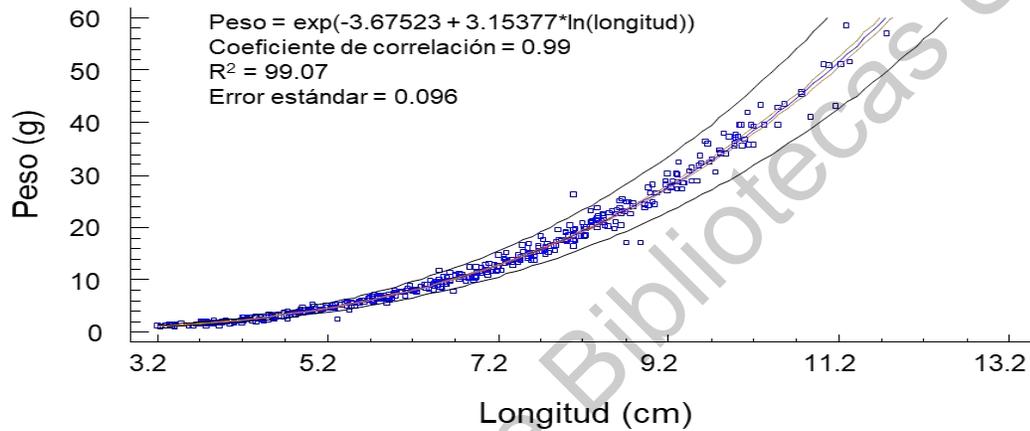


Figura 43. Relación de longitud-peso de crías de *O. niloticus* en un sistema acuapónico hiperintensivo.

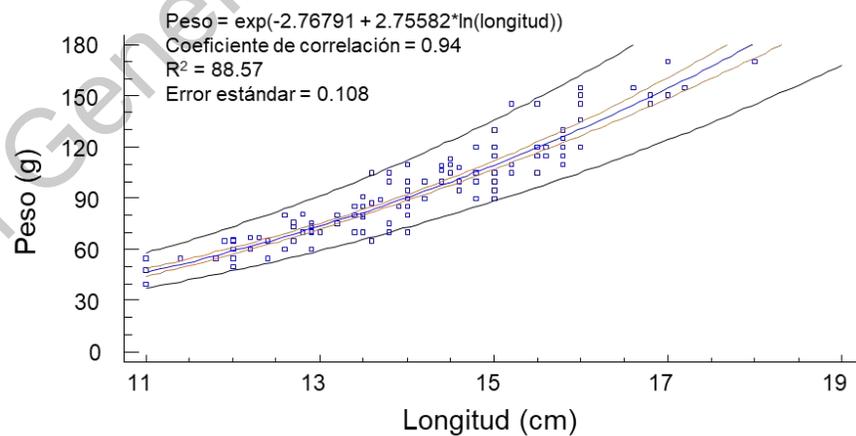


Figura 44. Relación de longitud-peso de juveniles de *O. niloticus* en un sistema acuapónico hiperintensivo.

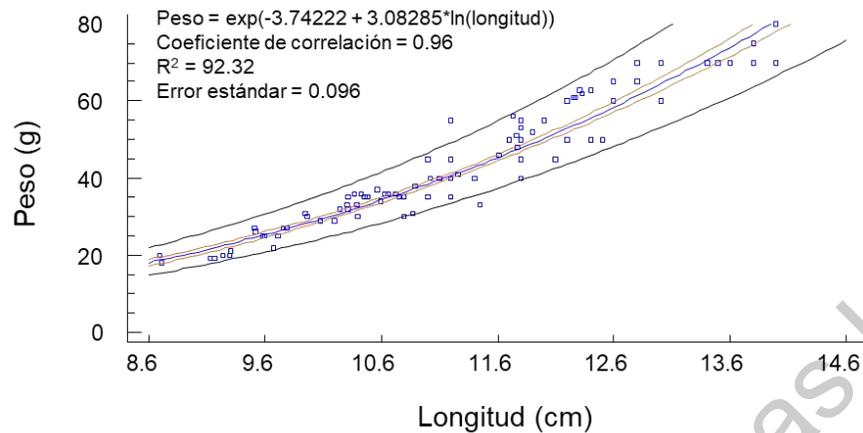


Figura 45. Relación de longitud-peso de adultos de *O. niloticus* en un sistema acuapónico hiperintensivo.

6.3.3 Calidad del filete de tilapia

Con respecto a la calidad del filete se llevó a cabo un análisis de composición proximal, en donde se determinó la humedad, cenizas, grasas, proteínas totales, fibra cruda y carbohidratos (Tabla 16). Los resultados se presentan en porcentaje en base húmeda. En el caso del pescado, el factor con mayor importancia es el porcentaje de proteína; de acuerdo a investigaciones llevadas a cabo, el filete de tilapia debe oscilar entre 15-25 % (Gabriel *et al.*, 2017; Biswas *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018; Grassi *et al.*, 2020). Con respecto a lo antes mencionado, los resultados arrojados muestran una buena calidad del pescado en las tres etapas de desarrollo, siendo el juvenil el que presenta el menor porcentaje de proteína (25.02 %) y el adulto el mayor (35.33 %). El porcentaje de grasas presentó valores muy bajos, lo que indica una muy buena calidad del filete (0.87 a 1.31 %).

Tabla 16. Estimadores del análisis bromatológico para *Oreochromis niloticus* en tres etapas de desarrollo (cría, juvenil y adulto) en un cultivo acuapónico hiperintensivo.

Estimadores	Tratamientos		
	Cría	Juvenil	Adulto
Humedad (%)	67.18±0.038 ^a	71.22±0.07 ^b	59.91±0.02 ^c
Cenizas (%)	2.29±0.06 ^a	1.88±0.01 ^b	2.53±0.06 ^c
Grasas totales (%)	1.07±0.04 ^a	0.87±0.03 ^b	1.31±0.04 ^c
Proteínas (%)	28.70	25.02	35.33
Fibra cruda	0.02	0.01	0.02
Carbohidratos totales (%)	0.21±0.09 ^a	0.00±0.22 ^a	0.32±0.03 ^a

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indican que existe una diferencia significativa ($P < 0.05$).

6.3.4 Crecimiento de tomate

Con respecto al jitomate se obtuvo un porcentaje de germinación de 68, 83, 80 y 81 para alevines, juveniles, adultos y cultivo hidropónico, respectivamente. El mejor desarrollo (crecimiento, floración y fructificación) se produjo en el cultivo hidropónico debido a la solución nutritiva especial para el buen desarrollo de este tipo de cultivo, así como al ajuste de pH que se hizo al agua que alimentó el cultivo. El desarrollo de los cultivos acuapónicos se produjo casi por igual en los tratamientos con agua residual de alevines y juveniles, no existiendo diferencias significativas entre ellos (Figura 46). Ambos tratamientos tuvieron diferencias

significativas en el crecimiento con relación al de agua residual de adulto de tilapia, en donde no hubo floración ni fructificación. La tasa de supervivencia tuvo el mismo comportamiento que el crecimiento; el valor más alto fue para los jitomates alimentados con agua de alevines (100%), seguido por el cultivo de vegetales con agua de tilapia juvenil (96.66%) y finalmente, la tasa de supervivencia más baja fue en cultivo regado con agua residual de adultos de tilapia (86.66%) (Tabla 17).

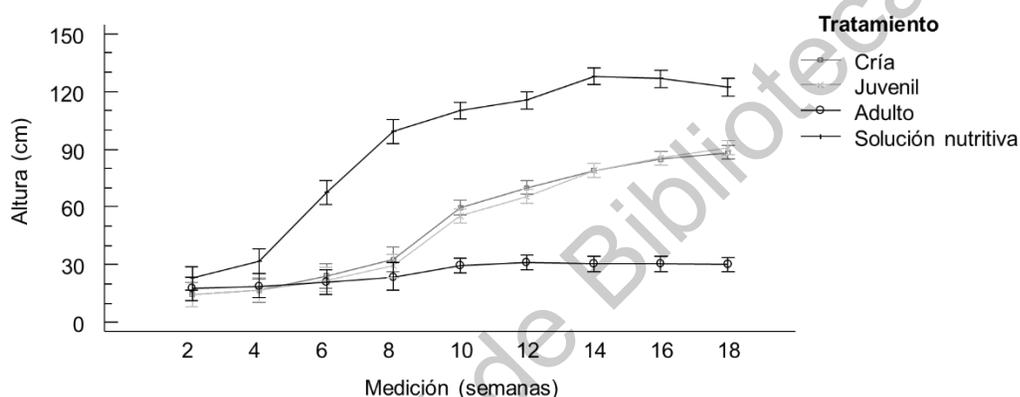


Figura 46. Crecimiento (cm) de jitomate (*S. lycopersicum*) en un cultivo acuapónico con agua residual de crías, juveniles y adultos de tilapia, y un cultivo hidropónico con solución nutritiva.

Tabla 17. Estimadores de crecimiento para jitomate (*Solanum lycopersicum*) regados con agua residual de tres estados productivos de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico hiperintensivo.

Estimadores de crecimiento	Tratamientos			
	Crías	Juveniles	Adultos	Cultivo hidropónico

Número inicial (n)	60	60	60	40
Número final (n)	60	58	52	38
Tasa de sobrevivencia (%)	100	96.66	86.66	95
Germinación (%)	68	83	80	81
Altura promedio inicial (cm)	14.43±2.05	14.61±1.76	17.68±2.16	23±3.97
Altura promedio final (cm)	94.50±26.29	94.31±30.34	30.04±10.81	125.78±27.77
Producción final (kg/m ²)	3.05	3.67	0	5.015

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indican que existe una diferencia significativa ($P < 0.05$).

En comparación con la hidroponia, la acuaponia en sus tres tratamientos obtuvo menor altura de la planta, menor cantidad de hojas, el tiempo de floración fue más largo, al igual que el tiempo de cosecha; sin embargo, el tamaño de los frutos fue mayor en el acuapónico de juvenil, así como el peso de la planta en general (Tabla 18). En el caso del cultivo de jitomate con el agua proveniente de adulto se tuvo un deficiente crecimiento y no hubo producción; por lo que no se recomienda el cultivo acuapónico con esta etapa productiva del pez. Al llevar a cabo un comparativo con estudios similares se observa que la altura del tallo, tanto en el cultivo de cría como el de juvenil, fue menor a lo reportado por quienes suplementaron con Moringa y obtuvieron una altura de 153.12 ± 0.40 cm, comparado con 94 cm para los tratamientos del presente estudio; sin embargo, Martínez-Meingüer *et al.* (2020) suplementaron su cultivo acuapónico, lo que genera mejores condiciones de desarrollo, además de que no reportan datos de producción del fruto.

Con respecto a la primera cosecha, los mejores resultados en cuanto a producción de fruto y crecimiento de la planta se obtuvieron para el cultivo

hidropónico (85 días), seguido del cultivo acuapónico con agua de cría de tilapia a los 88 días, y por ultimo el de juvenil a los 90 días, después del transplante. Al respecto, Somerville *et al.* (2014) reportan la fructificación en jitomate alrededor de los 90 días después del transplante; los que indica que los tres tratamientos en los que hubo producción, estuvieron dentro del rango señalado para su cosecha.

Con relación al tamaño del fruto, el cual es un aspecto importante a considerar en la comercialización del producto, el mejor resultado se obtuvo en el tratamiento con agua proveniente del cultivo de juveniles. Sin embargo, en los dos tratamientos acuapónicos en donde se obtuvo producción, así como en el hidropónico, el tamaño del fruto está dentro de la categoría de frutos medianos, de acuerdo a la NMX-FF-031-1997; esta norma establece las especificaciones de calidad que deben de cumplir los jitomates para ser consumidos en estado fresco y comercializados en el territorio nacional. Esto indica que el tamaño es aceptable para la comercialización, pero aún se encuentra por debajo de los mejores resultados que se puedan obtener.

Tabla 18. Factores de crecimiento y cosecha de jitomate cultivado en sistema hidropónico y acuapónico con agua residual acuícola de tilapa en tres etapas de producción.

Factores de crecimiento y cosecha	Hidropónico	Acuapónico cría	Acuapónico juvenil	Acuapónico adulto
Altura de la planta (cm)	125.78±27.77 ^c	94.50±26.29 ^a	94.31±30.34 ^a	30.04±10.81 ^b
Número de hojas (planta -1) (AP)	34.05±10.68 ^a	27.1±7.46 ^b	25.3±7.01 ^b	19.85±5.20 ^c
Tiempo de floración (DAT)	27	48	48	NA
Tiempo de cosecha (DAT)	85	88	90	NA
Peso fresco de fruto individual (g fruto-1)	52.49±17.98 ^a	51.31±17.05 ^{ab}	63.43±26.42 ^b	NA

Diámetro polar (mm)	54.74±7.88 ^a	59.42±6.99 ^b	64.20±11.75 ^b	NA
Diámetro ecuatorial (mm)	43.14±5.70 ^a	44.69±6.56 ^a	49.44±8.91 ^b	NA
Peso fresco de planta (g planta ⁻¹)	74.26±14.14 ^a	67.8±9.80 ^a	75.89±15.65 ^a	6.78±2.13 ^b
Peso fresco de raíces (g planta ⁻¹)	10.92±2.54 ^c	7.97±1.93 ^a	6.69±1.27 ^a	2.29±1.14 ^b

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indican que existe una diferencia significativa (P<0.05).

Uno de los aspectos importantes de la calidad del jitomate depende de sus características organolépticas, que son las que determinan el sabor. Algunos de los factores con mayor importancia que determinan el sabor del fruto del jitomate son el pH, la acidez titulable y los grados Brix. Los jitomates son alimentos generalmente ácidos y el pH de sus frutos oscila entre 4.0 y 4.5; es así que, cuanto menor sea el pH, mayor será la acidez, factor por el que puede ser juzgada la calidad del jitomate (Ntinas *et al.*, 2019). En este estudio, el mayor porcentaje de acidez se presentó en el cultivo hidropónico, encontrándose diferencias significativas con los cultivos acuapónicos. Al llevar a cabo un comparativo de la acidez titulable con cultivos hidropónicos similares, podemos observar que en el presente trabajo se tienen valores altos; por ejemplo, Kaur *et al.* (2018) reportan que a mayor suplemento de potasio, mayor acidez, obtuvieron sus mayores valores en 0.64 con una solución nutritiva muy alta en potasio, indicando que esto mejora la calidad sensorial del tomate. Por otro lado, Ayarna *et al.* (2020) obtuvieron valores de 0.36 y 0.42 de acidez titulable para tomates en cultivo hidropónico.

Los grados Brix indican el porcentaje de los sólidos disueltos, que, en el caso del jitomate, serían principalmente los azúcares totales (glucosa, fructosa), ácidos (cítrico y málico), y otros componentes en menor cantidad (fenoles, aminoácidos, ácido ascórbico y sales inorgánicas). Se obtuvieron diferencias significativas en los grados brix entre todos los tratamientos, siendo el mayor valor para los frutos con

agua de crías de tilapia; sin embargo, el valor para todos los tratamientos es comparable con lo obtenido en otras investigaciones como la de De Luca *et al.* (2021) quienes obtuvieron entre 5.1 y 5.9 °Brix para jitomate hidropónico; por otro lado, Kaur *et al.* (2018) obtuvieron su mayor resultado en un cultivo hidropónico con una solución nutritiva alta en potasio y fue de 5.27.

Los resultados obtenidos en las investigaciones antes mencionadas, así como el hecho de que un mínimo de 5 y 0.4 para grados Brix y acidez titulable, respectivamente, se consideran deseables para producir tomates de buen sabor (Beckles, 2012); por lo que se puede considerar que los jitomates producidos en esta investigación son frutos de buena calidad en cuanto a sabor se refiere, por lo que son aptos para consumo (Tabla 19).

Tabla 19. Estimadores de calidad para jitomate (*Solanum lycopersicum*) regados con agua residual de tres estados productivos de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema acuapónico hiperintensivo.

Estimadores de calidad	Tratamientos			
	Crías	Juveniles	Adultos	Cultivo hidropónico
Grados brix	6.28±0.44 ^a	5.12±0.54 ^b	NA	5.78±0.34 ^c
Porcentaje de acidez	0.62±0.02 ^{ab}	0.54±0.07 ^a	NA	0.68±0.004 ^b
pH	5.51±0.04 ^a	5.27±0.11 ^b	NA	5.36±0.10 ^{ab}

Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indican que existe una diferencia significativa (P<0.05).

6.4 Dinámica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en diferentes etapas de producción de tilapia y jitomate en acuaponia, para establecer la eficiencia del sistema de producción.

Los macronutrientes (nitrógeno y fósforo) son elementos presentes en todos los organismos vivos; por lo que se llevó a cabo el seguimiento de estos dos nutrientes y su transformación a través de todo el sistema acuapónico en tres etapas productivas de la tilapia.

En el cálculo del balance de nitrógeno y fósforo en el afluente del agua del sistema de recirculación acuapónica, el alimento del pez se convirtió en la única fuente de nutrientes, considerándose como el 100% de cada uno de los elementos; es así que, el porcentaje de los nutrientes que integran el flujo en cada uno de los tratamientos se calcularon a partir de la entrada de los mismos al sistema.

6.4.1 Nitrógeno

El nitrógeno en los sistemas agrícolas modernos suele ser un nutriente muy ineficiente, ya que al rededor del 50% de la entrada al sistema se pierde en el ambiente al no ser aprovechado por la planta en cultivo; lo cual, resulta en toxicidad hacia el medio ambiente (Coskun, 2017). En particular en los sistemas acuapónicos se requiere del nitrógeno para cumplir con los requerimientos nutricionales tanto de los peces como de los vegetales, siendo la única entrada del nitrógeno el alimento de los peces. El flujo del nitrógeno, en porcentaje, desde su entrada y durante todo su trayecto se muestra en las Figuras 47, 48 y 49, para crías, juveniles y adultos, respectivamente.

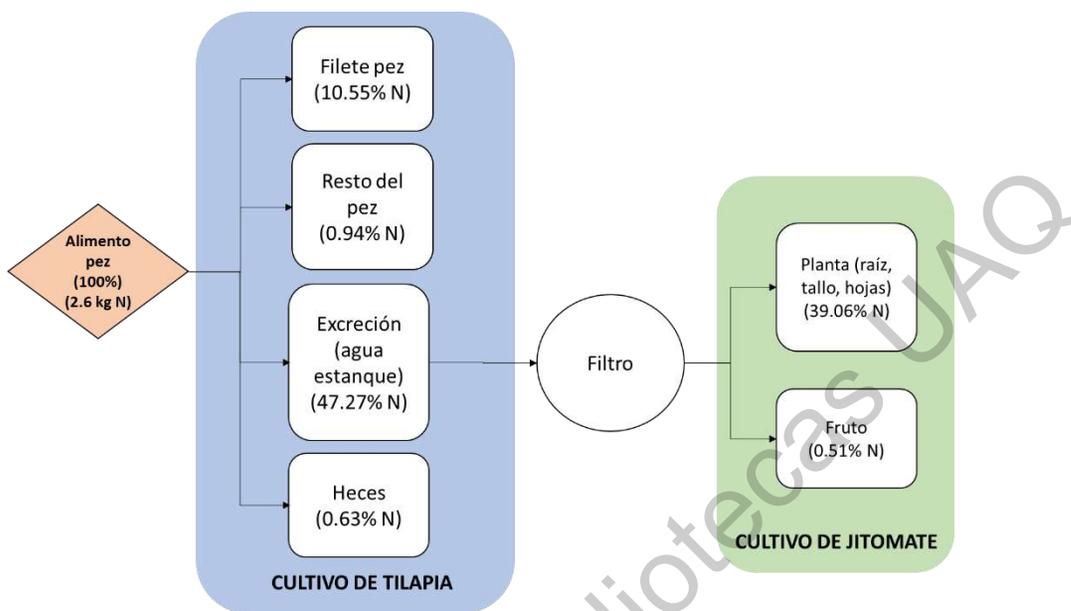


Figura 47. Flujo de nitrógeno en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre crías de tilapia y jitomate.

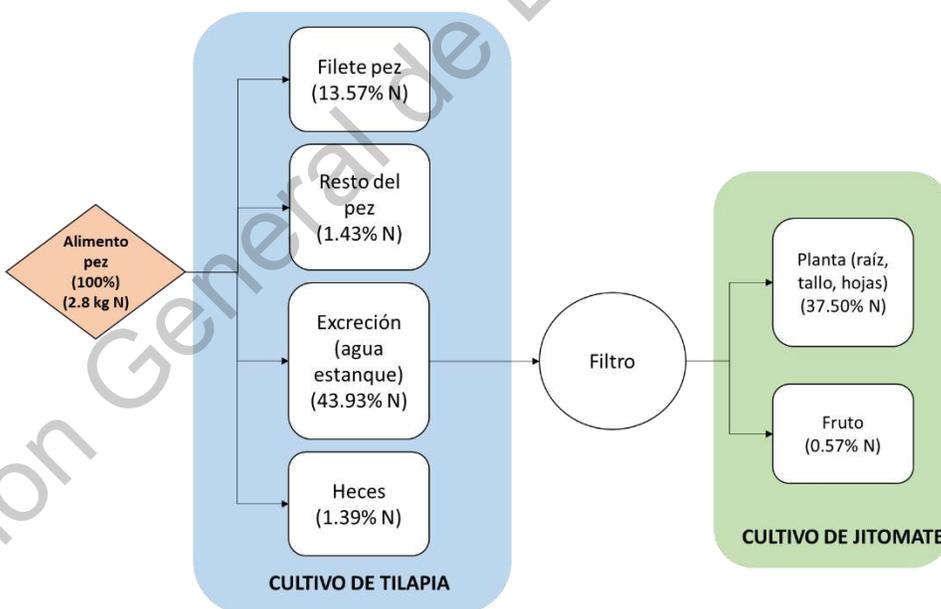


Figura 48. Flujo de nitrógeno en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre juveniles de tilapia y jitomate.

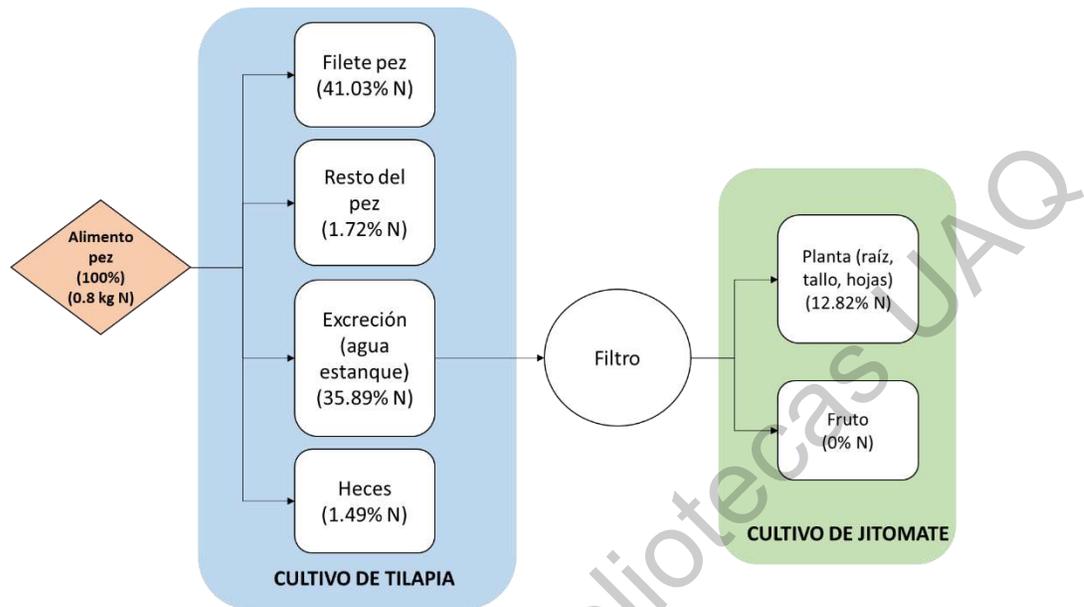


Figura 49. Flujo de nitrógeno en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre adultos de tilapia y jitomate.

La entrada del nitrógeno al sistema se dió unicamente como proteína a través del alimento de los peces, lo cual varió por la etapa de alimentación del pez (50 %, 45 %, 35 % de proteína para cría, juvenil y adulto, respectivamente). Este alimento fue ingerido en su mayor parte, metabolizado, transformado y liberado por los peces.

Con respecto a los adultos, la mayor parte del nitrógeno que ingresó al sistema fue metabolizado por el pez, convirtiéndolo en nitrógeno retenido en el pescado (42.75 %), en su mayoría como proteína en el filete, brindando un pescado de muy buena calidad; sin embargo, no se excretó la suficiente cantidad para la nutrición vegetal, por lo que no hubo producción de jitomate y el crecimiento de la planta fue muy deficiente. En el caso de las crías y juveniles se tuvo un menor porcentaje de nitrógeno en el filete del pescado (11.49 y 15 %, respectivamente). Un estudio acuícola (Moustafa *et al.*, 2020) reporta que, del total de nitrógeno ingresado a un sistema por el alimento del pez, el 25% se convirtió en biomasa del pez (peso inicial

de 160 g y densidad de cultivo de 9.6 kg/m³). Lo anterior coincide con los resultados de Osti *et al.* (2018), quienes indican que el 26 % del nitrógeno total ingresado se convierte en biomasa del pez; Osti *et al.* (2018) trabajaron con tilapias con un peso inicial de aproximadamente 191 kg y bajo una densidad de cultivo menor a 1 kg/m³. Por otro lado, Wang *et al.* (2012) encontraron que el 38 % del nitrógeno que entra a un sistema acuícola a través del alimento es convertido en biomasa del pez, y el 62 % restante es liberado al medio ambiente.

Con relación al nitrógeno liberado al medio ambiente, para los tratamientos de crías y juveniles, el mayor porcentaje que entró al sistema fue excretado como compuestos nitrogenados (en su mayoría nitrógeno amoniacal) (47.27 y 43.93 % para crías y juveniles, respectivamente); es por ello que, el porcentaje de nitrógeno presente en el agua fue suficiente para la asimilación por parte del cultivo vegetal. Por lo que hubo crecimiento de la planta y producción de jitomate, sin necesidad de suplementar con otro tipo de nutrición; contrario a lo sucedido con los adultos, en donde no se tuvo producción de jitomate. Moustafa *et al.* (2020) reportaron que un 43.64 % del nitrógeno que entra a un sistema acuícola con tilapias en su etapa adulta se encuentra en el agua distribuido en diferentes compuestos nitrogenados (nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos).

Acerca de los lodos (heces de tilapia) se encontró que éstas tienen menos nutrientes que el agua. Se ha informado que el contenido de nitrógeno contenido en las heces de peces varía de 10 a 40 %, dependiendo de la especie del organismo y del contenido de nitrógeno en el alimento (van Rijn, 2013); sin embargo, en los tres tratamientos se tuvieron cantidades menores en el porcentaje de nitrógeno contenido en las heces de las tilapias (0.63, 1.39 y 1.49 % para crías, juveniles y adultos, respectivamente).

El tejido vegetativo de la planta de jitomate (raíz, tallo y hojas) fue el segundo sitio que contenía la mayor cantidad de nitrógeno para crías y juveniles (39.06 y

37.50 % de N), y el tercer sitio para los adultos (12.82 % de N); lo antes señalado, debido a los requerimientos de nitrógeno en la planta, el cual es necesario para la producción de proteína, ácido nucléico NH_4^+ (iones de amonio), NO_3^- (iones de nitrato) y ATP, entre otros (Li *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2015), por lo que es vital para su desarrollo.

Con lo antes expuesto se demuestra que la distribución del nitrógeno se vé significativamente afectada por la etapa productiva del pez, sobretodo en su fase adulta con respecto a la de juveniles y cría (Figura 50). No se detectan grandes pérdidas de nitrógeno en los tratamientos de crías y juveniles, por lo que la mayor parte se encuentra en constante flujo a través del sistema; por el contrario, en el caso de los adultos, se observan pérdidas de este nutriente, las cuales no son aprovechadas para el crecimiento y producción vegetal. Diversos autores mencionan que la distribución de nitrógeno en un sistema acuapónico se puede ver afectada por el diseño del sistema, el manejo y tipo de alimentación, el método de fertirrigación y los métodos de medición, entre otros (Knaus y Palm, 2017; Delaide *et al.*, 2019; Groenveld *et al.*, 2019; Yang y Kim, 2020).

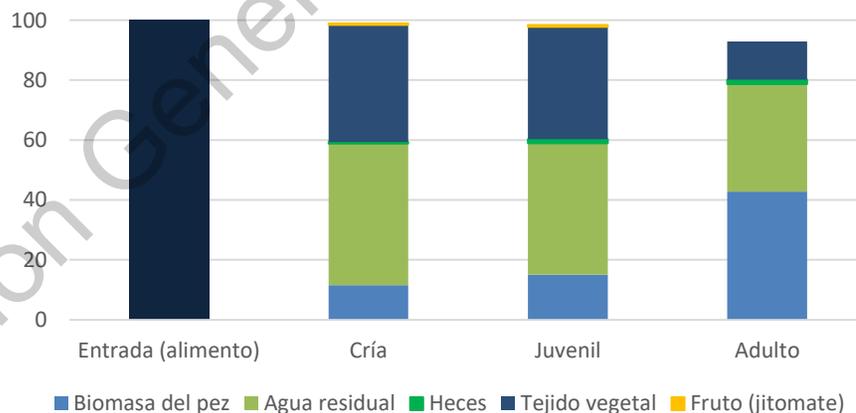


Figura 50. Balance del nitrógeno en el sistema acuapónico en diferentes tratamientos de etapas productivas del pez.

6.4.2 Fósforo

Los efluentes de sistemas de producción acuícolas son ricos en fósforo que se encuentran en sólidos disueltos y suspendidos en el agua del cultivo y que se generan a partir de la excreción del pez, las heces y el alimento no consumido (Cerozi y Fitzsimmons, 2017). El fósforo no asimilado por los peces es liberado al medio ambiente provocando contaminación, al igual que con el nitrógeno; al mismo tiempo, el fósforo representa un nutriente fundamental para la producción agrícola, por lo que se llevó a cabo el flujo del fósforo en un cultivo acuapónico tilapia-jitomate (Figuras 51, 52 y 53).

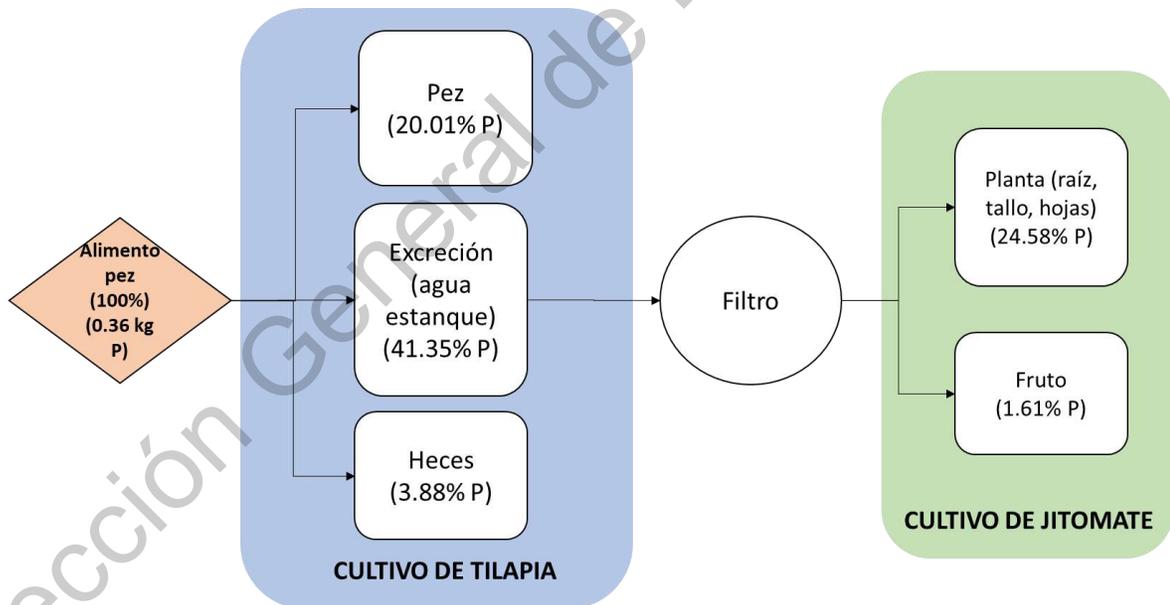


Figura 51. Flujo de fósforo en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre crías de tilapia y jitomate.

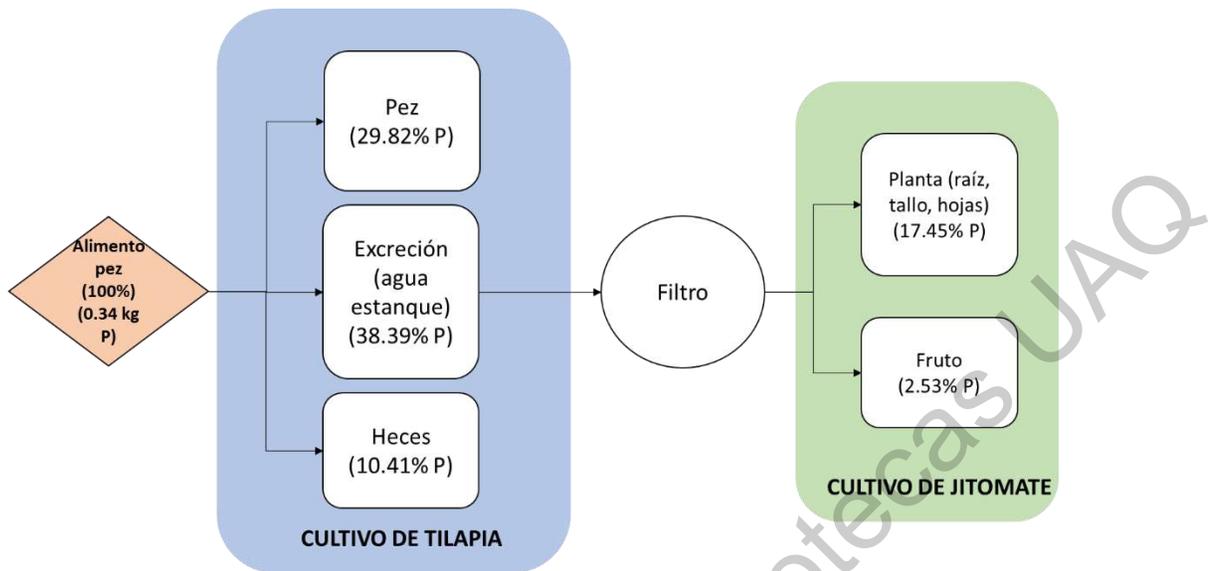


Figura 52. Flujo de fósforo en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre juveniles de tilapia y jitomate.

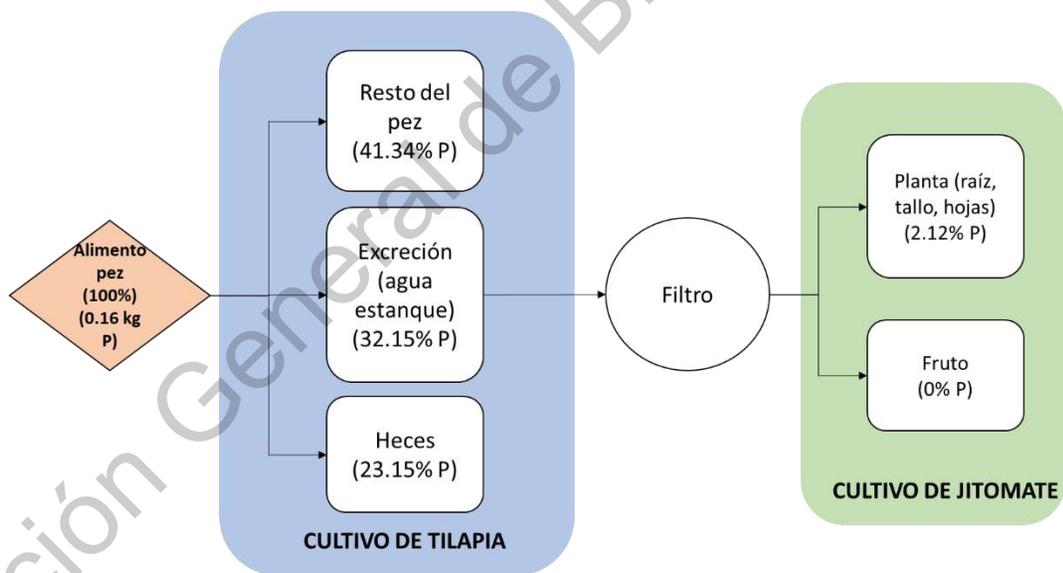


Figura 53. Flujo de fósforo en un cultivo acuapónico hiperintensivo entre adultos de tilapia y jitomate.

Como se puede observar, el mayor porcentaje de fósforo se asimiló como tejido animal, seguido del fósforo contenido en el agua del cultivo. En el caso de los adultos de tilapia se reporta un uso ineficiente de fósforo, ya que gran porcentaje se queda contenido en las heces, lo cual se desperdicia, y es por éste motivo que este nutriente no se encontró disponible para el uso vegetal; por lo antes mencionado, se presentó un crecimiento muy ineficiente del tejido vegetal y no se tuvo producción de fruto. En los cultivos con crías y juveniles se contó con la cantidad suficiente de fósforo en el agua para la producción del fruto, se observa una mejor distribución del fósforo. En un estudio similar (Yang y Kim, 2020) se reportan valores de 36.3 % pez, 25.2 % tejido vegetal, 2.4 % desperdicios sólidos y 28 % agua. Los datos antes mencionado difieren con respecto a los del presente estudio sobretodo en el porcentaje contenido en la heces, para el presente estudio se obtuvieron mayores porcentajes de fósforo en la heces, lo que indica una asimilación deficiente por parte de este nutriente. Debido a lo anterior, se sugiere el uso de las heces en algún otro proceso para la utilización de este nutriente.

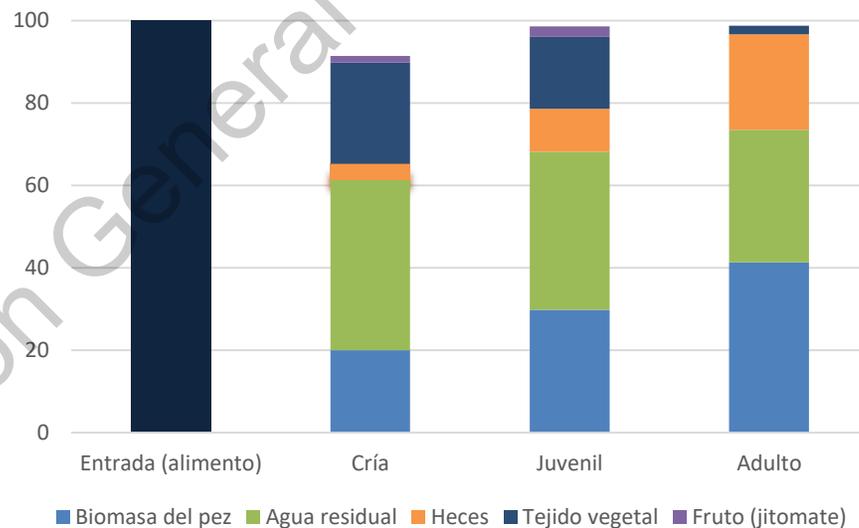


Figura 54. Balance del fósforo en el sistema acuapónico en diferentes tratamientos de etapas productivas del pez.

6.5 Evaluación del rendimiento del sistema

Uno de los aspectos importantes de la acuaponía es lograr un aumento en la producción y el rendimiento, que puedan traducirse en mayores ganancias económicas para los productores. El rendimiento de los cultivos acuapónicos regularmente se ve afectado por los niveles de nutrientes esenciales y que pudieran llegar a ser tóxicos (Yang y Kim, 2020); es por ello que se llevó a cabo un análisis comparativo de tres etapas productivas de los peces, y el efecto del agua residual cargada de nutrientes, sobre la producción de tomate y del propio pez.

La tilapia, en sus tres etapas productivas, se sembró con la proyección de obtener 80 kg/m³ de cosecha; sin embargo, la producción pudo haberse modificado por la mortandad de los individuos o una variación en el crecimiento, por la gran densidad de población, entre otros factores. Los resultados al finalizar el experimento mostraron un mayor rendimiento de peces para el cultivo de juveniles de tilapia, con una producción total final de 106 kg/m³, seguido de los adultos con 78.98 kg/m³ y por último las crías con 68.16 kg/m³ (Tabla 21). Lo antes señalado muestra que es posible el cultivo hiperintensivo de tilapia sin afectar considerablemente la producción final del cultivo, ni la calidad del producto (como se mostró en los resultados de análisis proximal del filete de tilapia).

Gran cantidad de factores pueden contribuir en las diferencias en la productividad de los cultivos, pero todos tienen su acción en sus efectos sobre el crecimiento, la supervivencia y la eficiencia alimentaria (Mengistu *et al.*, 2020). Por lo antes mencionado, se llevó a cabo la evaluación del rendimiento en los cultivos de tilapia en los tres tratamientos por las diferencias en las tasas de crecimiento y las tasas de conversión alimenticia.

Con respecto al factor de conversión alimenticia (FCA), Craig (2009) reporta un FCA aceptable cuando el valor es menor a 2. La importancia de este factor radica

en el hecho de que el mayor costo de la producción acuícola se da en la compra del alimento; por lo que un aumento en este factor incrementa el costo de inversión y baja el rendimiento de los sistemas acuícolas. De acuerdo a lo antes señalado, y a pesar de la hiperdensidad manejada en el presente estudio, los valores de conversión alimenticia para los tres tratamientos se encontraron dentro del intervalo aceptable para una buena rentabilidad en el sistema (1.96, 1.65 y 1.76 para crías, juveniles y adultos, respectivamente). Lo anterior es de interés para mejorar la sostenibilidad del cultivo con el aprovechamiento del alimento, reduciendo los desperdicios que se traducen en pérdidas económicas y daños al medio ambiente (Rodde *et al.*, 2020).

Con respecto a la tasa específica de crecimiento, la que asume que el peso de los individuos aumenta de manera exponencial, muestra diferencias significativas entre los tres estados productivos de la tilapia, siendo mayor para las etapas productivas tempranas y menor para las tallas productivas altas. Los resultados obtenidos se explican con el hecho de que mientras un organismo crece de tamaño, la tasa de su actividad metabólica se reduce, disminuyendo de la misma forma la tasa de crecimiento. Trabajos con otras especies de peces muestran un descenso en la tasa específica de crecimiento con respecto a la edad del organismo, situación que es común para la mayoría de los peces de climas templados (Solimano *et al.*, 2014). A pesar de las diferencias entre tallas productivas, la tasa específica de crecimiento es comparable con otras investigaciones en las mismas tallas, pero con diferencias en la densidad de población, como se muestra en la Tabla 20. Por la razón antes mencionada, y debido a los comparativos con investigaciones similares mencionadas, la tasa específica de crecimiento para las tres etapas de desarrollo muestra un sistema de producción rentable de tilapia.

Tabla 20. Cuadro comparativo de tasa específica de crecimiento en tilapia en tres etapas productivas de cultivos acuapónicos.

Etapa productiva	Peso (g)	Densidad del cultivo final (kg/m³)	Tiempo de experimento	TEC	Autor
Cría	3.64 - 43.25	68.16	126 días	3.01	Actual investigación
Cría	5 - 351.17	33.90	160 días	2.65	Wang <i>et al.</i> , 2020
Cría	1.44 - 56	8.40	120 días	1.84	Saseendran <i>et al.</i> , 2021
Cría	3.94 - 10.18	1.14	60 días	1.58	Angkha <i>et al.</i> , 2020
Juvenil	62 - 201.17	106.22	126 días	1.40	Actual investigación
Juvenil	36.67 - 220.95	7.70	112 días	1.60	Yong <i>et al.</i> , 2018
Juvenil	36.24 - 100.67	62.50	49 días	2.13	Bowyer <i>et al.</i> , 2020
Juvenil	17.92 - 72.92	6.52	60 días	2.37	Mohammadi <i>et al.</i> , 2020
Juvenil	18.2 - 25.2	11.25	56 días	2.19	Ani <i>et al.</i> , 2021
Adulto	196.32 - 359	78.93	126 días	0.65	Actual investigación
Adulto	284 -	20.00	30 días	0.6	Yang y Kim, 2020
Adulto	70-88.12	7.74	21 días	0.96	Pinho <i>et al.</i> , 2017
Adulto	72.96 – 102.83	27.76	60 días	0.70	Félix-Cuencas <i>et al.</i> , 2021

Por otro lado, y de acuerdo a lo reportado por la FAO (2012), el tomate es uno de los vegetales más cultivados en acuaponía, además de representar un vegetal altamente consumido por sus propiedades; es por ello que se decidió

trabajar con este fruto altamente consumido en México. La tasa específica de crecimiento de la longitud de la planta más alta fue para el tratamiento de riego con agua residual de crías de tilapia (2.24 %), seguida de los juveniles (2.22 %) y el cultivo hidropónico (2.02 %); quedando muy por debajo el cultivo acuapónico con adultos de tilapia (0.63 %). Trabajos similares de producción de tomate acuapónico han reportado tasas de crecimiento de 2.96 %, superior a lo reportado en el presente estudio; no obstante, sus cultivos fueron suplementados con moringa y fertilizados (Martínez-Meingüer *et al.*, 2020).

Con respecto al rendimiento del fruto se obtuvieron resultados muy similares para los tres tratamientos en donde hubo producción (a excepción del acuapónico con adulto de tilapia). El rendimiento fue de 5.90, 5.96 y 6.09 kg/m² para cría, juvenil e hidropónico, respectivamente, a los 80 días de cosecha después del transplante. Los resultados de producción señalados coinciden con los datos de la ficha técnica de la semilla con la que se trabajó, en donde se reporta una producción de 5-8 kg/m². Zahan *et al.* (2018) obtuvo un rendimiento de 7.04 kg/m²/109 días en un cultivo acuapónico con las mismas especies que en el presente trabajo; sin embargo, ellos en su investigación suplementaron con calcio proveniente de cáscara de huevo de gallina, aunado a que su cosecha fue por más tiempo (109 días). Por lo antes señalado, se reporta un rendimiento adecuado para los tratamientos acuapónicos con agua de cría y juvenil de tilapia, sin suplementos al sistema, cuyos datos son comparables con otras investigaciones con cultivos acuapónicos, pero con suplemento de nutrientes. No obstante, la producción pudo mejorarse de haberse bajado los niveles de pH (alrededor de 7.8), debido a que niveles menores de pH favorecen la absorción de nutrientes minerales por las plantas como fue descrito por Rakocy (2012). Por lo antes señalado, se deduce que puede establecerse un sistema acuapónico con un buen rendimiento para ambas especies cultivadas, sin recambios de agua y sin añadir fertilizantes al cultivo

vegetal; pero el rendimiento pudiera ser mejorado si se ajustan algunas condiciones físicas en el agua del cultivo.

Tabla 21. Estimadores de producción y rendimiento de tilapia (*O. niloticus*) y jitomate (*S. lycopersicum*) en el cultivo acuapónico.

Estimadores de producción y rendimiento	Tratamientos			Cultivo hidropónico
	Crías	Juveniles	Adultos	
Tasa específica de crecimiento pez (TEC, % día)	4.02	1.86	0.86	-
Factor de conversión alimenticia (% día)	1.38	1.62	1.44	-
Rendimiento pez cosechado (kg/m ³)	68.16	106.22	78.98	-
Tasa específica de crecimiento planta (TEC, % día)	2.24	2.22	0.63	2.02
Rendimiento jitomate cosechado (kg/m ²)	5.90	5.96	0	6.09

Por otro lado, se llevó a cabo el cálculo del factor de crecimiento acuapónico adimensional de acuerdo a lo establecido por Knaus y Palm (2017). Este factor representa la desviación del mejor crecimiento posible. La comparación de la biomasa de especies animales, expresada en AGF, mostró una mayor producción para los juveniles de tilapia comparado con las crías y adultos como se muestra en la Figura 51. La producción de jitomate es igual al comparar los tratamientos de riego de cría con juvenil y juvenil con hidroponia, y la producción del sistema hidropónico es ligeramente mayor al compararlo con el riego de cría. Lo antes señalado indica el mayor crecimiento, traducido a mayor producción de peces, para

el tratamiento con juveniles. En el caso del cultivo vegetal, la producción entre los acuapónicos de cría y juvenil fueron iguales, siendo ligeramente mayor para el cultivo hidropónico (Figura 52).

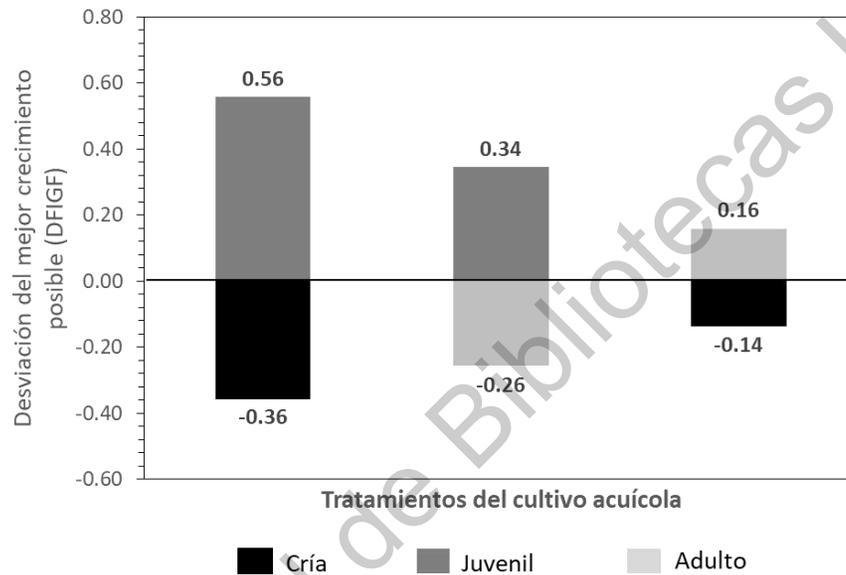


Figura 55. Desviación del mayor crecimiento de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) en tres estados productivos bajo un cultivo de recirculación acuapónico.

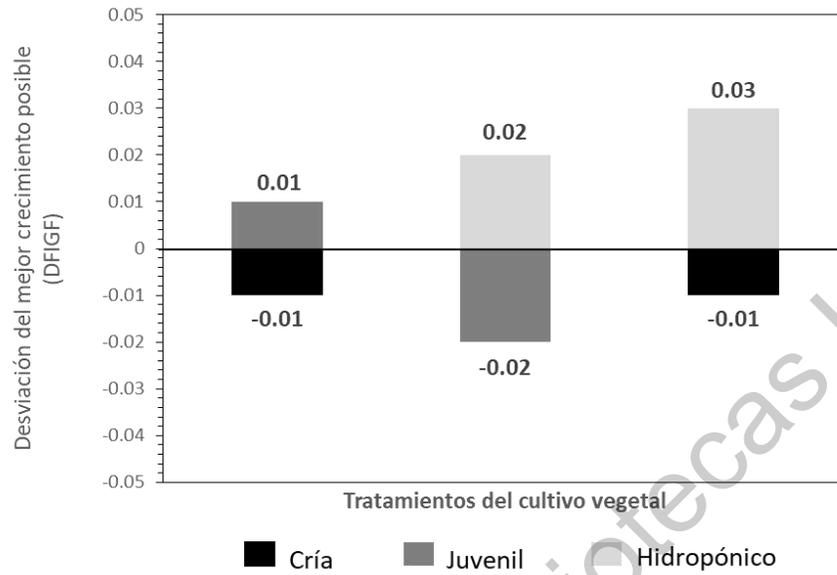


Figura 56. Desviación del mayor crecimiento de la producción de jitomate hidropónico con agua proveniente de crías y juveniles de tilapia, y cultivo con solución nutritiva estándar.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

7. CONCLUSIÓN

Un análisis comparativo de un sistema acuapónico hiperintensivo de tilapia y jitomate bajo tres etapas productivas de pez fue diseñado, desarrollado y validado de manera experimental. La viabilidad de los cultivos acuapónicos se ve influenciada por el contenido de nutrientes en el sistema, donde de manera general es requerida la adición complementaria de los mismos. Sin embargo, al incrementar la densidad de cultivo a 80 kg/m^3 se genera una mayor concentración de nitrógeno y fósforo, particularmente en el agua proveniente de las primeras etapas productivas de la tilapia; esto proporciona los nutrientes necesarios para la producción de jitomate, evitando la suplementación externa de los mismos, así como se logra el aprovechamiento del agua al reducir la necesidad de recambios. Se recomienda abordar en estudios futuros el desarrollo de sistemas acuapónicos hiperintensivos de producción continua con la mezcla de las aguas residuales provenientes de las etapas productivas de crías y juveniles de tilapia, con la finalidad de mantener una producción constante de pez, al mismo tiempo que se aprovechan las aguas residuales cargadas de nutrientes para el cultivo vegetal.

8. REFERENCIAS

- Abbasi Rabiya, Pablo Martinez y Rafiq Ahmad. (2021). An ontology model to support the automated design of aquaponic grow beds. *Procedia CIRP*, 100, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.009>.
- Adler, P.R., Harper, J.K., Wade, E.M., Takeda, F. y Summerfelt, S.T. (2000). Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *Int. J. Recirc. Aquac.*, 1,15-34. <https://doi.org/10.21061/ijra.v1i1.1359>.
- Al Tawaha, A. R., Megat Wahab, P. E., binti Jaafar, H., Kee Zuan, A. T. y Hassan, M. Z. (2021). Effects of fish stocking density on water quality, growth performance of tilapia (*Oreochromis niloticus*) and yield of butterhead lettuce (*Lactuca sativa*) grown in decoupled recirculation aquaponic systems. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 8-19. <https://doi.org/10.12911/22998993/128692>
- Al-Asgah, N., y Ali, A. (2007). Growth performance and body composition of *Oreochromis niloticus* reared at different water temperatures. *Annales de Zootechnie*, 46(4), 331–338. <https://doi.org/10.1051/animres:19970404>
- Allison, E. H., Delaporte, A., y Hellebrandt de Silva D. (2013). Integrating fisheries management and aquaculture development with food security and livelihoods for the poor. Report submitted to the Rockefeller Foundation, School of International Development, University of East Anglia Norwich, 124p.
- Al-Rawahy, M.S., Al-Rawahy, S.A., Al-Mulla, Y.A. y Nadaf, S.K. (2019). Influence of nutrient solution temperature on its oxygen level and growth, yield and quality of hydroponic cucumber *J. Agr. Sci.*, 11,75-92.

Álvarez, T.P., F. Soto; Q.S. Aviles; L.C. Díaz y C.L. Treviño. (2012). Panorama de la investigación y su repercusión sobre la producción Acuícola en México. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca -Instituto Nacional de la Pesca. 30 pp.

Angkha, B., Verma, A.K., Kumar, S.H. (2020). Mobilization of mica by *Bacillus* sp. and its effect on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cum holy basil (*Ocimum tenuiflorum*) based aquaponic system. *Aquacult Int.*, 28, 2045–2058. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00575-4>

Ani Josiah Sabwa, Julius O. Manyala, Frank O. Masese, Kevin Fitzsimmons. (2021). Effect of stocking density on growth performance of monosex Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in the aquaponic system integrated with lettuce (*Lactuca sativa*). *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.03.002>.

Antolinos, Vera, María J. Sánchez-Martínez, José F. Maestre-Valero, Antonio López-Gómez, and Ginés B. Martínez-Hernández. (2020). Effects of Irrigation with Desalinated Seawater and Hydroponic System on Tomato Quality. *Water*, 12(2), 518. <https://doi.org/10.3390/w12020518>.

AOAC. (1990). Official Methods of Analysis, 15th, Washington DC: Association of Analytical Chemists.

Asase, A., Ewusie Nunoo, F. K. y Klenam Attipoe, F. Y. (2016). Lake-based nursery rearing of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings in nylon hapas: Effects of stocking density on growth, survival and profitability. *Agricultural Sciences*, 7, 660–669. <https://doi.org/10.4236/as.2016.710062>.

Ayarna Williams, Alex, Satoru Tsukagoshi, George Oduro Nkansah, Na Lu, and Kazuya Maeda. (2020). Evaluation of Tropical Tomato for Growth, Yield,

Nutrient, and Water Use Efficiency in Recirculating Hydroponic System. *Agriculture*, 10(7), 252. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070252>.

Azaza, M. S., Assad, A., Maghrbi, W., y El-Cafsi, M. (2013). The effects of rearing density on growth, size heterogeneity and inter-individual variation of feed intake in monosex male Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. *Animal*, 7(11), 1865–1874. <https://doi.org/10.1017/S1751731113001493>.

Bailey, D.S., Ferrarezi, R.S. (2017). Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. *Aquac. Reports*, 7, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>.

Baixauli, S. y Aguilar, O. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas. Generalitat Valenciana. Valencia, España. Serie de Divulgación Técnica. Núm. 53. 110 p.

Baldisserotto, B., Martos-Sitcha, J. A., Menezes, C. C., Toni, C., Prati, R. L., Garcia, L. de O., Martínez-Rodríguez, G. (2014). The effects of ammonia and water hardness on the hormonal, osmoregulatory and metabolic responses of the freshwater silver catfish *Rhamdia quelen*. *Aquatic Toxicology*, 152, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2014.04.023>.

Banco Mundial “World Bank Group”. (2015). Informe sobre el desarrollo mundial 2015: mente, sociedad y conducta - panorama general. Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20597>.

Barreto-Curiel, F., Durazo, E. & Viana, M. T. (2015). Growth, ammonium excretion, and oxygen consumption of hybrid red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis aureus*) grown in seawater and freshwater. *Ciencias Marinas*, 41(3), 247–254. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v41i3.2526>.

- Bartelme, R.P., McLellan, S.L., Newton, R.J. (2017). Freshwater recirculating aquaculture system operations drive biofilter bacterial community shifts around a stable nitrifying consortium of ammonia-oxidizing archaea and comammox Nitrospira. *Front. Microbiol.*, 8, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00101>.
- Beckles Diane M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.016>.
- Beltrano, J., y Giménez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía. Recuperado a partir de <https://doi.org/10.35537/10915/46752>.
- Biswas, M., M.S. Islam, P. Das, P.R. Das, M. Akter. (2018). Comparative study on proximate composition and amino acids of probiotics treated and nontreated cage reared monosex tilapia *Oreochromis niloticus* in Dekar haor, Sunamganj district, Bangladesh. *Int. J. Fisher. Aquatic Stud*, 6 (2), 431-435.
- Blanchard, Caroline, Daniel E. Wells, Jeremy M. Pickens, and David M. Blersch (2020). Effect of pH on Cucumber Growth and Nutrient Availability in a Decoupled Aquaponic System with Minimal Solids Removal. *Horticulturae*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6010010>.
- Bowyer, P. H., El-Haroun, E. R., Salim, H. S. y Davies, S. J. (2020). Benefits of a commercial solid-state fermentation (SSF) product on growth performance, feed efficiency and gut morphology of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed different UK lupin meal cultivars. *Aquaculture*, 523, 735192. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735192>.
- Bradley K (2014) Aquaponics: a brief history.

- Cai, Junning y Zhou, Xiaowei. (2019). Contribution of aquaculture to total fishery production: the 50 percent mark. *FAO Aquaculture Newsletter*. Rome. 60, 43-45.
- Cao, B., Abakari, G., Luo, G., Tan, H. y Wu, X. (2020). Comparative analysis of nitrogen and phosphorus budgets in a bioflocs aquaculture system and recirculation aquaculture system during over-wintering of tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*). *Aquacultural Engineering*, 89, 102026. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.102026>
- Capkin, E., Kayis, S., Boran, H., & Altinok, I. (2010). Acute Toxicity of Some Agriculture Fertilizers to Rainbow Trout. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 10(1), 19–25. <https://doi.org/10.4194/trjfas.2010.0103>.
- Cerozi, B. S. y Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems*, 153, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020>.
- Chakraborty, S. B. y Banerjee, S. (2010). Effect of Stocking Density on Monosex Nile Tilapia Growth during Pond Culture in India. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 4(8), 646–650.
- Chen Bo-Ching y Liao Chung-Min. (2004). Farmed tilapia *Oreochromis mossambicus* involved in transport and biouptake of arsenic in aquacultural ecosystems. *Aquaculture*, 242(1–4), 365-380. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.09.009>.
- Chen, P., Zhu, G., Kim, H., Brown, P. B. y Huang, J. (2020). Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States.

Journal of Cleaner Production, 275, 122888.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122888>.

Cifuentes, R., González, J., Montoya, G., Jara, A., Ortiz, N., Piedra, P. y Habit, E. (2011). Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). *Gayana (Concepción)*, 76, 86-100. 10.4067/S0717-65382012000100009.

Coskun, D., Britto, D., Shi, W. (2017). Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants*, 3, 17074. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.74>.

Craig S, Helfrich LA. (2009). Understanding fish nutrition, feeds, and feeding Virginia cooperative extension, Communications and Marketing, College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University. Publication, 420, 256

Danaher, J.J., Shultz, R.C., Rakocy, J.E. and Bailey, D.S. (2013). Alternative Solids Removal for Warm Water Recirculating Raft Aquaponic Systems. *J World Aquacult Soc*, 44, 374-383. <https://doi.org/10.1111/jwas.12040>.

De Luca, Anna, Mireia Corell, Mathilde Chivet, M. A. Parrado, José M. Pardo, y Eduardo O. Leidi. (2021). Reassessing the Role of Potassium in Tomato Grown with Water Shortages. *Horticulturae* 7(2), 20. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7020020>.

Delaide, Boris, Simon Goddek, James Gott, Hélène Soyeurt y M. H. Jijakli. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics. *Water*, 8(10), 467. <https://doi.org/10.3390/w8100467>.

- Desai, A. S., & Singh, R. K. (2009). The effects of water temperature and ration size on growth and body composition of fry of common carp, *Cyprinus carpio*. *Journal of Thermal Biology*, 34(6), 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2009.03.005>.
- Ding X, Jiang Y, Zhao H, Guo D, He L, Liu F. (2018). Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system. *PLoS ONE*, 13(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202090>.
- Ebeling, J.M., Timmons, M.B., Bisogni, J.J. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257, 346–358.
- El-Sayed, A.-F. M. (2006). Tilapia culture in salt water: environmental requirements, nutritional implications and economic potentials. *Avances en VIII Simposium Internacional de Nutrición Acuícola*, (August 2010), 95–106. <https://doi.org/10.1027/1015-5759/a000129>.
- El-Sherif, M.S. and A.M.I. El-Feky. (2009). Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. I. Effect of pH. *Int. J. Agric. Biol.*, 11, 297–300.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W.B., Hassan, A., (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour. Technol.*, 101, 1511-1517. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>.
- Endut, A., Lananan, F., Hamid, S. H. A., Jusoh, A. y Nik, W. N. W. (2016). Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by African catfish (*Clarias*

gariepinus) in scaling aquaponic recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 1–10. doi: 10.1080/19443994.2016.1184593.

Ennabili Abdeslam, Mohammed Ater, Michel Radoux. (1998). Biomass production and NPK retention in macrophytes from wetlands of the Tingitan Peninsula. *Aquatic Botany*, 62(1), 45-56. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(98\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00075-8).

Falah, M.A.F., Wajima, T., Yasutake, D., Sago, Y. and Kitano, M. (2010). Responses of root uptake to high temperature of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in soil-less culture. *Journal of Agricultural Technology*, 6(3), 543-558.

Fang, Y., Hu, Z., Zou, Y., Zhang, J., Zhu, Z., Zhang, J., Nie, L. (2017) Improving nitrogen utilization efficiency of aquaponics by introducing algal bacterial consortia. *Bioresource Technology*, 245, 358-364.

FAO, Food Agricultural Organization. (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Disponible en: www.apps.fao.org. (Junio 2012).

FAO. 2014. The State of World Fisheries and Aquaculture. Opportunities and Challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. P.223

FAO. 2016. El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura. (The State of World Fisheries and Aquaculture). FAO, Rome, Italy.

FAO. 2018. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

FAO. 2020. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>.

FAO2, (ed.) 2014. Strengthening the Enabling Environment for Food Security and Nutrition. FAO, Rome.

Félix-Cuencas Leticia, Juan Fernando García-Trejo, Samuel López-Tejeida, Jesús Josafat de León-Ramírez, Claudia Gutiérrez-Antonio, Ana Angélica Feregrino-Pérez. (2021). Nitrogen and phosphorus flux in wastewater from three productive stages in a hyperintensive tilapia culture. *Journal of Water Reuse and Desalination*. doi: <https://doi.org/10.2166/wrd.2021.070>

Filep, M., Ștefan, D., Monica, M., Badulescu, L., Nicolae, C. (2016). Case study on water quality control in an aquaponic system. *Current trends in natural sciences*, 5(9), 06-09.

Forchino, A.A., Lourguioui, H., Brigolin, D., Pastres, R. (2017). Aquaponics and sustainability: the comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). *Aquacult. Eng.*, 77, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.03.002>.

Foyzal Md Javed, Mahbubul Alam, A.Q.M. Robiul Kawser, Fahad Hasan, Md Mahbubur Rahman, Chin-Yen Tay, Md Shamsul Haque Prodhan, Sanjay Kumar Gupta. (2020). Meta-omics technologies reveals beneficiary effects of *Lactobacillus plantarum* as dietary supplements on gut microbiota, immune response and disease resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 520. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734974>.

Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight–length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22, 241–253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>.

Gabriel, N.N, J. Qiang, X.Y. Ma, P. Xu, y D.N. Nakwaya. (2017). Effects of dietary *Aloe vera* crude extracts on digestive enzyme activities and muscle

proximate composition of GIFT tilapia juveniles. South African Journal of Animal Science, 47: 904-913.

García-Trejo, J.F., G.A. Peña-Herrejón, G.M. Soto-Zarazúa, A. Mercado-Luna, O. Alatorre-Jácome, E. Rico-García. (2016). Effect os stocking density on growth performance and oxygen consumption of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) under greenhouse conditions. Latin American Journal of Aquatic Research, 44(1): 177-183.

Ghamkhar, R., Boxman, S. E., Main, K. L., Zhang, Q., Trotz., M. A. y Hicks, A. (2021). Life cycle assessment of aquaculture systems: Does burden shifting occur with an increase in production intensity? Aquacultural Engineering, 92, 102130. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102130>.

Ghozlan, A., Nour, A., Essa, M. A., Ebiary, E. H., Gaber, M. M., y Zaki, M. A. (2018). Effect of Stocking Density on Growth Performance, Production Trait, Food Utilization and Body Composition, of Meagre (*Argyrosomus regius*). World Journal of Engineering and Technology, 06(03), 37–47. <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.63b005>.

Gichana, Z., Meulenbroek, P., Ogello, E., Drexler, S., Zollitsch, W., Liti, D., Akoll, P. y Waidbacher, H. (2019). Growth and nutrient removal efficiency of sweet wormwood (*Artemisia annua*) in a recirculating aquaculture system for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Water, 11, 923. doi:10.3390/w11050923.

Gilsanz, C. J. (2007). Hidroponía. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Ed. Andes 31 pp.

Goddek, S., Keesman, K.J. (2018). The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination, 428, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.024>.

- Goddek, Simon, Boris Delaide, Utra Mankasingh, Kristin V. Ragnarsdottir, Haissam Jijakli, and Ragnheidur Thorarinsdottir. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability* 7(4): 4199-4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>.
- Gomez, C., Currey, C. J., Dickson, R. W., Kim, H.-J., Hernández, R., Sabeh, N. C., Raudales, R. E., Brumfield, R. G., Laury-Shaw, A., Wilke, A. K., Lopez, R. G. y Burnett, S. E. (2019). Controlled environment food production for urban agriculture. *Hortscience*, 54, 1448–1458. <https://doi.org/10.21273/hortsci14073-19>.
- Gozlan, R. E., Britton, J. R., Cowx, I., & Copp, G. H. (2010). Current knowledge on non-native freshwater fish introductions. *Journal of Fish Biology*, 76(4), 751–786. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02566.x>
- Grassi, T.L.M., Paiva, N.M., Oliveira, D.L. (2020). Growth performance and flesh quality of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed low concentrations of *Rubrivivax gelatinosus*, *Saccharomyces cerevisiae* and *Spirulina platensis*. *Aquacult Int.*, 28, 1305–1317. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00527-y>
- Groenveld Thomas, Yair Y. Kohn, Amit Gross, Naftali Lazarovitch. (2019). Optimization of nitrogen use efficiency by means of fertigation management in an integrated aquaculture-agriculture system. *Journal of Cleaner Production*, 212, 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.031>.
- Gullian Klanian, M., Delgadillo Diaz, M., Aranda, J., Rosales Juarez, C. (2018). Integrated effect of nutrients from a recirculation aquaponic system and foliar nutrition on the yield of tomatoes *Solanum lycopersicum* L. and *Solanum pimpinellifolium*. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25, 17807-17819. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1817-5>.

Gullian-Klanian, M. A. A. C. (2013). Performance of Nile tilapia *O. niloticus* fingerlings in a hyper-intensive recirculating aquaculture system with low water exchange. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(1), 150–162.

Hawkesford Malcolm, Walter Horst, Thomas Kichey, Hans Lambers, Jan Schjoerring, Inge Skrumsager Møller, Philip White. (2012). Chapter 6 - Functions of Macronutrients. Editor(s): Petra Marschner. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>.

Hosseinzadeh, S., Verheust, Y., Bonarrigo, G. (2017). Closed hydroponic systems: operational parameters, root exudates occurrence and related water treatment. *Rev Environ Sci Biotechnol.*, 16, 59–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9418-6>.

<https://www.milkwood.net/2014/01/20/aquaponics-a-brief-history/>

Hu, Z., Woo, J., Chandran, K., Kim, S., Coelho, A. y Kumar, S. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology*, 188, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>.

Huang, W. B., & Chiu, T. S. (1997). Effects of stocking density on survival, growth, size variation, and production of Tilapia fry. *Aquaculture Research*, 28(3), 165–173. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1997.tb01029.x>

Jia, S., Zhang, X., Miao, Y., Zhao, Y., Ye, L., Li, B. y Zhang, T. (2017). Fate of antibiotic resistance genes and their associations with bacterial community in livestock breeding wastewater and its receiving river water. *Water Research*, 124, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.061>.

- Junge, Ranka, Bettina König, Morris Villarroel, Tamas Komives y M. H. Jijakli. (2017). Strategic Points in Aquaponics. *Water*, 9(3), 182. <https://doi.org/10.3390/w9030182>.
- Kaur Harsimran, Seema Bedi, V. P. Sethi y A. S. Dhatt. (2018). Effects of substrate hydroponic systems and different N and K ratios on yield and quality of tomato fruit. *Journal of Plant Nutrition*, 41(12), 1547-1554. DOI: 10.1080/01904167.2018.1459689.
- Kledal P.R., Thorarinsdottir R. (2018). Aquaponics: A Commercial Niche for Sustainable Modern Aquaculture. In: Hai F., Visvanathan C., Boopathy R. (eds) Sustainable Aquaculture. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2_6.
- Knaus, U., H.W. Palm. (2017). Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). *Aquaculture*, 466, 51-63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025>.
- König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., Junge, R. (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *J. Clean. Prod.*, 180, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.037>.
- Lee, S., Nambi, R. W., Won, S., Katya, K., y Bai, S. C. (2016). Dietary selenium requirement and toxicity levels in juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 464, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.06.027>.
- Lemos, C. H. da P., Ribeiro, C. V. D. M., de Oliveira, C. P. B., Couto, R. D., y Copatti, C. E. (2018). Effects of interaction between pH and stocking density on the growth, haematological and biochemical responses of Nile tilapia juveniles. *Aquaculture*, 495, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.037>.

- Li M Q, Li J Y, Wei X H, Zhu W J. (2017). Early diagnosis and monitoring of nitrogen nutrition stress in tomato leaves using electrical impedance spectroscopy. *Int J Agric & Biol Eng.*, 10(3): 194–205.
- Likongwe, J. S., Stecko, T. D., Stauffer, J. R. y Carline, R. F. (1996). Combined effects of water temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linneaus). *Aquaculture*, 146(1–2), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01360-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01360-9).
- Lima, F. R. D. S., Cavalcante, D. D. H., Rebouças, V. T. y Sá, M. V. do C. e. (2016). Interaction between afternoon aeration and tilapia stocking density. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 38(1), 23. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v38i1.27093>
- Love, D.C., Fry, J.P., Genello, L., Hill, E.S., Frederick, J.A., Li, X., Semmens, K. (2014). An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One* 9, 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>.
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K., Thompson, R.E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. *Aquaculture*, 435: 67–74.
- M.P. Brahmane, B. Sajjanar, N. Kumar, S.S. Pawar, S.K. Bal and K.K. Krishnani. (2017). Impact of rearing temperatures on Tilapia *Oreochromis mossambicus* growth, muscle morphology and gene expression. *Journal of Environmental Biology*, 38: 1261-1266. DOI: <http://doi.org/10.22438/jeb/38/6/MRN-440>.
- Ma, X. Y., Qiang, J., He, J., Gabriel, N. N. y Xu, P. (2015). Changes in the physiological parameters, fatty acid metabolism, and SCD activity and expression in juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared at three

different temperatures. *Fish Physiology and Biochemistry*, 41(4), 937–950. <https://doi.org/10.1007/s10695-015-0059-4>.

- Majumder, R., y Kaviraj, A. (2017). Cypermethrin induced stress and changes in growth of freshwater fish *Oreochromis niloticus*. *International Aquatic Research*, 9(2), 117–128. <https://doi.org/10.1007/s40071-017-0161-6>
- Malik, A., Abbas, G., Soombro, M. A., Shah, S. S. A., Asadullah, A., Bhutto, A. H., Jamali, G. Q. y Roonjho, Z. (2017). Length-weight relationship and condition factor of red tilapia (hybrid) reared in cemented tanks of sun-bright red tilapia and ornamental hatchery-Karachi, Sindh-Pakistan. *Sindh University Research Journal (Science Series)*, 49(1), 159–162.
- Martínez-Meingüer, A.M., Catro-Mejía, G., Vázquez-Silva, G., Castro-Mejía, J. y Catro-Castellón, A.E. 2020.
- Mehrim, A. I., Khalil, F. F., Refaey, M. M. y Abdalqadir, A. M. (2018). Impacts of Pro-Grow® on Growth Performance, Physiological, Immune Responses and Economic Efficiency of Adult *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) under Stocking Density Stress. *Science International*, 5(3), 113–126. <https://doi.org/10.17311/sciintl.2017.113.126>.
- Mengistu, S.B., Mulder, H.A., Benzie, J.A.H. y Komen, H. (2020). A systematic literature review of the major factors causing yield gap by affecting growth, feed conversion ratio and survival in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Rev. Aquacult.*, 12: 524-541. <https://doi.org/10.1111/raq.12331>.
- Mirea, C., Cristea, V., Grecu, R. I., Dediu, L. y Ion, V. (2013). Hematological and Biochemical Characterization of Nile Intensively in a Recirculating Aquaculture System in Relation to Water Temperature. *Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies*, 46(2), 234–237.

Mohammadi Ghasem, Gholamreza Rafiee, Mohammed F. El Basuini, Hien Van Doan, Hamada A. Ahmed, Mahmoud A.O. Dawood, Hany M.R. Abdel-Latif. Oregano (*Origanum vulgare*), St John's-wort (*Hypericum perforatum*), and lemon balm (*Melissa officinalis*) extracts improved the growth rate, antioxidative, and immunological responses in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) infected with *Aeromonas hydrophila*. *Aquaculture Reports*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100445>.

Moniruzzaman, M. (2015). Effects of Stocking Density on Growth, Body Composition, Yield and Economic Returns of Monosex Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) under Cage Culture System in Kaptai Lake of Bangladesh. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 06(08). <https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000357>.

Moustafa, Y. T. A., Ali, A. A. A., Gomha, S. A. A. y Glal, E. M. (2020). Nitrogen and phosphorus budget for Nile tilapia hatchery. *Egyptian Journal for Aquaculture*, 10(1), 1–22. <https://doi.org/10.21608/eja.2020.21286.1012>.

Nelson, R. L. (2008). *Aquaponic Food Production*. Montello, WI: Nelson and Pade Inc.

Ngo, H.H., W. Guo, T.P. Tram Vo, L.D. Nghiem, F.I. Hai. (2017). Aerobic Treatment of Effluents From the Aquaculture Industry. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. 35-77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63665-2.00002-3>.

NMX-F-608-NORMEX-2011. Alimentos-determinación de proteínas en alimentos- método de ensayo. 12 septiembre 2011. <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-068-S-1980.PDF>.

- NMX-FF-031-1997. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano. Hortalizas frescas. Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Especificaciones. Normas mexicanas. Dirección general de Normas. 15 p. <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas>.
- Nobre, M. K. B., Lima, F. R. dos S., Magalhães, F. B. y Sá, M. V. do C. e. (2014). Alternative liming blends for fish culture. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 36(1), 11-16. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v36i1.21282>.
- Norma Mexicana NMX-F-102-NORMEX-2010. Determinación de acidez titulable en alimentos-método de ensayo (prueba). Diario Oficial de la Federación, México. 4 p.
- Norma Mexicana NMX-F-112-NORMEX-2010. Alimentos-determinación de sólidos solubles-método refractométrico. Diario Oficial de la Federación, México. 3 p.
- Ntinis, Georgios K., Kalliopi Kadoglidou, Nektaria Tsivelika, Konstantinos Krommydas, Apostolos Kalivas, Parthenopi Ralli y Maria Irakli. (2019). Performance and Hydroponic Tomato Crop Quality Characteristics in a Novel Greenhouse Using Dye-Sensitized Solar Cell Technology for Covering Material. *Horticulturae* 5(2), 42. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020042>.
- Nunoo, F. K. E. y Anani, F. A. (2016). Length-weight relationship and condition factor of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* fed farm-made and commercial tilapia diet. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 4(5), 647–650.
- Nunoo, F. K. E. y Asase, A. (2017). Comparative growth performance of *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) in cages at different stocking densities. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 5(4), 279–283.
- Obirikorang, K. A., Agbo, N. W., Obirikorang, C., Adjei-Boateng, D., Ahiave, S. E. y Skov, P. V. (2019). Effects of water flow rates on growth and welfare of Nile

tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture International*, 27, 449–462. <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00342-0>.

Ondhoro, C. C., Ndugwa, M., Boma, P., Byaruhanga, C., Egau, G. y Okullo, P. (2019). Stocking density, length-weight relationship and the condition of Nile tilapia in valley dam based floating cages in semi-arid Karamoja sub-region of Uganda. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management*, 4(2), 35–41. <https://doi.org/10.11648/j.ijnrem.20190402.11>.

Osti J. A. S., Moraes M. A. B., Carmo C. F. y Mercante C. T. J. (2018). Nitrogen and phosphorus flux from the production of Nile tilapia through the application of environmental indicators. *Brazilian Journal of Biology*, 78(1):25-31.

Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquacult. Int.*, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>.

Pardossi A, Carmassi G, Diara C, Incrossi L, Maggini R, Massa D. (2011). *Fertigation and Substrate Management in Closed Soilless Culture*. 1ª ed. Università di Pisa. Italia. 64 pp.

Patil, S.T., Kadam, U.S., Mane, M.S., Mahale, D.M. y Dekale, J.S. (2020). Hydroponic nutrient solution: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(5): 2095-2099.

Pineda-Pineda, J., Miranda-Velázquez, I., Ramírez-Arias, A., Vargas-Herández, M., Montalvo-Hernández, D., García-Galván, S. y García-Ramírez, N.M. (2020). Response of tilapia and tomato to the complementation of nutrients in an

aquaponic system. Acta Hortic., 1296, 101-108. DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1296.

Pinho Sara Mello, Diego Molinari, Giovanni Lemos de Mello, Kevin M. Fitzsimmons, Maurício Gustavo Coelho Emerenciano. (2017). Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. Ecological Engineering, 103, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.009>.

Rafiee Gholamreza, Saad Che Roos. (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis sp.*) growth in a recirculating aquaculture system. Aquaculture, 244(1-4), 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.10.029>.

Rahmat, R. M. T., Zidni, I., Iskandar y Junianto. (2019). Effect of difference filter media on Recirculating Aquaculture System (RAS) on tilapia (*Oreochromis niloticus*) production performance. World Scientific News, 118, 194-208.

Rakocy JE, Hargreaves JA. (1993). Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. In: Wang JK (ed) Techniques for modern aquaculture. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph Michigan USA, pp 112-136.

Rakocy, J.E. Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture. Wiley-Blackwell, Oxford, UK (2012), pp. 344-386.

Rakocy, J.E., Masser, M.P., Losordo, T.M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. SRAC Publ. - South. Reg. Aquac. Cent. 16.

Rebouças, V. T., Lima, F. R. dos S., Cavalcante, D. de H. y Sá, M. V. do C. e. (2015). Tolerance of Nile tilapia juveniles to highly acidic rearing water. Acta

Scientiarum. Animal Sciences, 37(3), 227-233.
<https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v37i3.27031>.

Resh, H.M. y Howard, M. (2012). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. CRC Press, Santa Barbara, California.
<http://dx.doi.org/10.1201/b12500>.

Resh, H.M. (2015). Hydroponics for the home grower. CRC Press, Boca Raton, FL.

Rodde Charles, Béatrice Chatain, Marc Vandeputte, Trong Quoc Trinh, John A.H. Benzie, Hugues de Verdal. (2020). Can individual feed conversion ratio at commercial size be predicted from juvenile performance in individually reared Nile tilapia *Oreochromis niloticus*?. Aquaculture Reports, 17, 100349.
<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100349>.

Ru, D., Liu, J., Hu, Z., Zou, Y., Jiang, L., Cheng, X., Lv, Z. (2017). Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. Environ. Sci. Pollut. Res., 24, 16328-16335. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1>.

Sánchez-Del Castillo, Felipe, Moreno-Pérez, Esaú del C., Pineda-Pineda, Joel, Osuna, José M., Rodríguez-Pérez, Juan E. y Osuna-Encino, Tomás. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. Agrociencia, 48(2), 185-197.

Saseendran Sanitha, Kiran Dube, M.H. Chandrakant, A.M. Babitha Rani. (2021). Enhanced growth response and stress mitigation of genetically improved farmed Tilapia in a biofloc integrated aquaponic system with bell pepper. Aquaculture, 533. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736200>.

- Schmautz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., Goesmann, A., Junge, R., Smits, T.H.M. (2017). Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. *Arch. Microbiol.*, 199, 613-620. <https://doi.org/10.1007/s00203-016-1334-1>.
- Scmautz,Z., C.A. Espinal, A.M. Bohny, F. Rezzonico, R. Junge, E. Frossard, T.H.M. Smits. (2020). Environmental parameters and microbial community profiles as indication towards microbial activities and diversity in aquaponic system compartments. *BMC Microbiol.* 10.1186/s12866-020-02075-0.
- Shi Z M, Tang J C, Cheng R M, Luo D, Liu S R. (2015). A review of nitrogen allocation in leaves and factors in its effects. *Acta Ecologica Sinica*, 35(18): 5909–5919.
- Signore A., Serio F., Santamaria P. (2016). A Targeted management of the nutrient solution in a soilless tomato crop according to plant needs. *Front. Plant Sci.* 7:391. 10.3389/fpls.2016.00391.
- Solimano, Patricio J., Garcia, Javier R., Maiztegui, Tomás., Bazzani, Julia L., Baigún, Claudio R. (2014). Evaluación de modelos del crecimiento en diferentes condiciones de cultivo de pejerrey (*Odontesthes bonariensis*). Instituto de Limnología "Dr. Raúl A. Ringuelet". *Biología Acuática*, 30; 219-228.
- Somerville, Christopher; Cohen, Moti; Pantanella, Edoardo; Stankus, Austin; Lovatelli, Alessandro. (2014). *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, Rome N.º 589.
- Soto-Zarazúa, M. G., Herrera-Ruiz, G., Rico-García, E., Toledano-Ayala, M., Peniche-Vera, R., Ocampo-Velázquez, R. y Guevara-González, R. (2010). Development of efficient recirculation system for Tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture using low cost materials. *African Journal of Biotechnology*, 9(32), 5203–5211.

- Steffensen, J. F. (1989). Some errors in respirometry of aquatic breathers: how to avoid and correct for them. *Fish Physiology and Biochemistry*, 6(1), 49–59.
- Suhl, Johanna, Dannehl, Dennis, Kloas, Werner, Baganz, Daniela, Jobs, Sebastian, Scheibe, Günther, Schmidt, Uwe. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>.
- Thoa, N., Ninh, N., Knibb, W. (2016). Does selection in a challenging environment produce Nile tilapia genotypes that can thrive in a range of production systems?. *Sci. Rep.* 6, 21486. <https://doi.org/10.1038/srep21486>.
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T., Vinci, B.J. (2002). *Recirculating Aquaculture Systems*, 2nd Edition. Cayuga Aqua Ventures, New York. 769 pgs.
- Timmons, M.B., J.M. Ebeling y R.H. Piedrahita. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Editorial Cayuga Ventures, Ithaca, 959 pp.
- Tseng, Y.C. y Hwang. P.P. (2008). Some insights into energy metabolism for osmoregulation in fish. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C.*, 148, 419-429. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2008.04.009>.
- Tyson, R.V., E. H. Simonne, M. Davis, E. M. Lamb, J. M. White y D. D. Treadwell. (2007). Effect of Nutrient Solution, Nitrate-Nitrogen Concentration, and pH on Nitrification Rate in Perlite Medium. *Journal of Plant Nutrition*, 30(6), 901-913. DOI: 10.1080/15226510701375101.
- Tyson, R.V., Treadwel, D.D., Simonne, E.H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, 21, 6-13.

- Urrestarazu, M., Morales, I., La Malfa, T., Checa, R., Wamser, A. F., & Álvaro, J. E. (2015). Effects of Fertigation Duration on the Pollution, Water Consumption, and Productivity of Soilless Vegetable Cultures, *HortScience horts.*, 50(6), 819-825.
- van Rijn, J. (2013). Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquac. Eng.*, 53, 49–56.
- Verdegem, M.C.J. (2013). Nutrient discharge from aquaculture operations in function of system design and production environment. *Reviews in Aquaculture*, 5: 158-171. <https://doi.org/10.1111/raq.12011>.
- Wang Kui, Kang Li, Liping Liu, Cristina Tanase, Rainier Mols, Michiel van der Meer. (2020). Effects of light intensity and photoperiod on the growth and stress response of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.03.001>.
- White, P. J., George, T. S., Gregory, P. J., Bengough, A. G., Hallett, P. D. y McKenzie, B. M. (2013). Matching roots to their environment. *Annals of Botany*, 112(2), 207–222. <https://doi.org/10.1093/aob/mct123>.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W., Khanal, S.K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. *Aquacult. Eng.*, 76, 9–19.
- Workagegn, K. B. (2012). Evaluation of Growth Performance, Feed Utilization Efficiency and Survival Rate of Juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). Reared at Different Water Temperature. *International Journal of Aquaculture*, 2(9), 59–64.
- Wu, F., Wen, H., Tian, J. (2018). Effect of stocking density on growth performance, serum biochemical parameters, and muscle texture properties of genetically

improved farm tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquacult Int.*, 26, 1247–1259.
<https://doi.org/10.1007/s10499-018-0281-z>.

Yang Teng y Hye-Ji Kim. (2020). Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato, basil, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 274.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122619>.

Yavuzcan Yildiz, Hijran, Lidia Robaina, Juhani Pirhonen, Elena Mente, David Domínguez and Giuliana Parisi. (2017). Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>.

Yep Brandon y Zheng Youbin. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1586-1599.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>.

Yong, S. T., M. Mardhati, J. Farahiyah, S. Noraini y Wong, H.K. (2018). Replacement of fishmeal in feather meal-based diet and its effects on tilapia growth performance and on water quality parameter. *J. Trop. Agric. And Fd. Sc.* 46(1), 47-55.

Yustiati, A., Aminah, S., Lili, W. y Andriani, I. B. B. Y. (2019). Effect of using potassium diformate as a feed additive to growth rate and feed efficiency of Nirwana Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *GSJ*. 7: 739-750.

Zahan S, KMS Rana, MK Islam, T Islam y MA Salam. (2018). Impact of calcium suppliments through egg shell on tomato (*Solanum lycopersicum*) production in Aquaponics System. *Int. J. App. Res.*, 4, 134-139.