



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

Rango de pH óptimo para el desarrollo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en acuaponía

OLIVER GABRIEL LEAL AYALA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

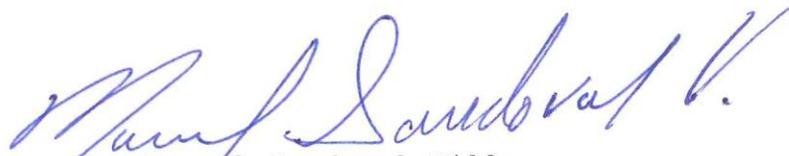
CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Oliver Gabriel Leal Ayala, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Manuel Sandoval Villa, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis RANGO DE pH ÓPTIMO PARA EL DESARROLLO DE TOMATE (Solanum lycopersicum L.) Y TILAPIA (Oreochromis niloticus) EN ACUAPONÍA y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 28 de Agosto de 2017



Firma del
Alumno (a)



Dr. Manuel Sandoval Villa

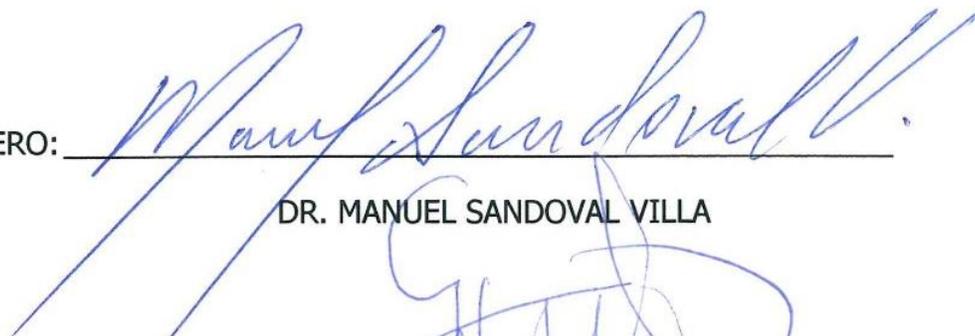
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Rango de pH óptimo para el desarrollo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en acuaponía**, realizada por el alumno: **Oliver Gabriel Leal Ayala**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

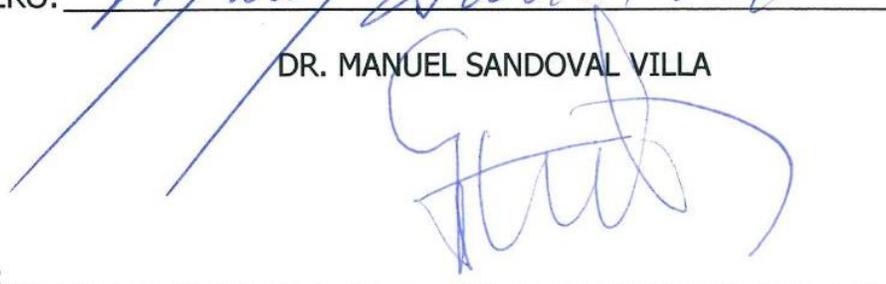
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



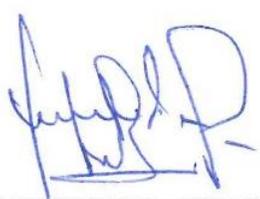
DR. MANUEL SANDOVAL VILLA

ASESOR:



DR. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR:



DR. JOEL PINEDA PINEDA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, agosto 2017

RANGO DE pH ÓPTIMO PARA EL DESARROLLO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) Y TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) EN ACUAPONÍA

Oliver Gabriel Leal Ayala, M.C.
Colegio de postgraduados, 2017

RESUMEN

La acuaponía surge a partir de la escasez mundial de agua dulce como una alternativa de producción de peces, la cual reduce extraordinariamente los requerimientos de agua en comparación con sistemas acuícolas tradicionales. La acuaponía liga la acuicultura con la hidroponía, pues aquí los efluentes generados en la producción de peces son utilizados como solución de fertirriego para las plantas. Es fundamental controlar una de las variables más importantes: el pH del medio acuoso donde se desarrollarán los peces y las plantas. Con el fin de establecer un pH más conveniente para el desarrollo conjunto de tilapia (*Oreochromis spp.*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se realizó investigación que consistió en el establecimiento de tres tratamientos con rangos de pH de 6 a 7, 7 a 8, 8 a 9 y un testigo con solución nutritiva de Steiner con pH de 5.5 a 6.5, bajo un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones. Durante el desarrollo de los cultivos se evaluaron diversas variables en plantas (altura, grosor de tallo, lecturas SPAD, número de frutos por racimo y rendimiento en peso por racimo), frutos (sólidos solubles totales, firmeza y acidez titulable) y peces (longitud, peso y altura). Asimismo, se determinó la concentración de macro y micro nutrientes en el efluente acuapónico a lo largo de la investigación. El intervalo de pH con mejores resultados estuvo dentro del rango de 6 a 8 (tratamientos 6 a 7 y 7 a 8), presentando superioridad estadística en la producción en tomate y tilapia llegando hasta un 232 y 25.8%, respectivamente, mayor al rango más alcalino (pH 9). Por otro lado, a pH de 6 a 7 aumenta la concentración de Ca y Mg y presenta una similitud el resto de los nutrientes en el efluente acuapónico respecto a los tratamientos más alcalinos. Debido a lo anterior, sistemas acuapónicos con sustrato en recirculación y acidificaciones parciales con ácido nítrico (HNO_3) produciendo tomate y tilapia, deben mantenerse lo más cercano al intervalo de pH de 6 a 7. Este rango de pH mejora la productividad y sostenibilidad de los sistemas acuapónicos con sustrato.

Palabras clave: acuicultura, recirculación, sustrato, ácido nítrico.

THE OPTIMAL pH FOR THE DEVELOPMENT OF TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.) AND TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) IN AQUAPONICS

Oliver Gabriel Leal Ayala, M.C.

Colegio de postgraduados, 2017

ABSTRACT

Aquaponics emerge from the global shortage of freshwater as an alternative to fish production that extraordinarily reduce water requirements compared to traditional aquaculture systems. Aquaponics connects aquaculture with hydroponics, because the effluents generated in fish production are used as a fertigation solution for plants. It is essential to control one of the most important factors: the pH of solution where the fish and plants will develop. In order to establish an optimum pH range for the development of tilapia (*Oreochromis* spp.) and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) an investigation was carried out consisting in the establishment of 3 treatments with pH ranges from 6 to 7, 7 to 8, 8 to 9 and a control with Steiner nutrient solution with a pH range from 5.5 to 6.5 with an experimental design completely at random with three replications. During the development of the crops, several variables were evaluated in plants (height, stem thickness, SPAD readings, number of fruits and fresh fruit yield (per cluster), fruits (total soluble solids, firmness and titratable acidity), and for fish (length, weight and height). Also, the concentration of macro and micro nutrients in the aquaponic effluent was determined throughout the investigation. The pH range with the best results was within the rank of 6 to 8 (treatments 6 to 7 and 7 to 8), showing a statistical superiority in tomato and tilapia yield up to a 232 and 25.8% higher than the most alkaline range (pH 9), respectively. On the other hand, pH ranges from 6 to 7 increased the concentration of Ca and Mg and showed similarity to the rest of the nutrients in the aquaponic effluent regarding the more alkaline treatment. Because of the stated above, aquaponics with recirculation and combined with substrate and partial acidification with nitric acid (HNO₃) to produce tomato and tilapia should be kept as close as possible to the pH range of 6 to 7. This pH ranges would improve productivity and sustainability of aquaponics with substrate.

Key words: Aquaculture, recirculation, substrate, nitric acid.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados y en especial al programa de edafología, por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación académica y fomentar en mí siempre el interés por la investigación científica.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, por su continuo apoyo durante mis estudios de postgrado.

Al Dr. Manuel Sandoval Villa, por brindarme su confianza, amistad, sus consejos, enseñanzas y por el apoyo continuo durante el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Gabriel Alcántar González, por su apoyo durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Al Dr. Joel Pineda Pineda, por el apoyo y consejos brindados en campo, así como, por facilitarme sus instalaciones para llevar a cabo esta investigación.

A mis padres, Dr. Víctor Manuel Leal León y Sra. Alma Lorena Ayala Soto, por todo su apoyo otorgado para concluir con esta meta.

DEDICATORIA

A mis padres:

Dr. Víctor Manuel Leal León y Sra. Alma Lorena Ayala Soto

Por su amor, apoyo, consejos, valores y la motivación constante que me han permitido alcanzar mis metas.

A mis hermanos:

Alma y Víctor

Por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis abuelos:

Eleazar Ayala Urías y Gloria Irma Soto Padilla

David Leal (†) y Rosario León Rendón

Por la confianza, consejos y amor brindado en toda mi vida.

A mi sobrina y sobrinos:

Ana Victoria, Juan Luis y José Manuel

Para que vean en mí un ejemplo a seguir

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 La Acuicultura	3
2.1.1 La acuicultura en el mundo	3
2.1.2 La acuicultura en México.....	4
2.2 La Acuaponía.....	5
2.2.1 Ventajas y desventajas de la acuaponía	7
2.2.2 La acuaponía como sistema agroalimentario sustentable.....	9
2.2.3 Situación actual de la acuaponía en México	10
2.3 El cultivo de tilapia	11
2.4 El cultivo de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	13
2.5 Balance de Masas	15
2.6 Tasas de carga.....	17
2.7 Crecimiento de Peces	18
2.8 pH.....	19
2.9 Conclusiones de la Revisión Bibliográfica	21
III. OBJETIVOS	23
General.....	23
Particulares	23
IV. HIPÓTESIS	23
General.....	23
Particulares	23
V. MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1. Localización.....	24
5.2. Descripción del Experimento	24
5.2.1 Conducción de los cultivos	26
5.3 Variables Evaluadas.....	27
5.3.1 Variables evaluadas en tomate.....	27
5.3.2 Variables evaluadas en tilapia	29
5.3.3 Variables evaluadas en efluente del sistema	30

5.4 Análisis Estadístico	30
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
6.1 El pH en el desempeño del sistema acuapónico	31
6.2 Conductividad eléctrica	33
6.3 Oxígeno disuelto en efluente acuapónico	35
6.4 Temperatura	38
6.5 Altura de plantas de tomate	40
6.6 Grosor del tallo	42
6.7 Lecturas SPAD	44
6.8 Rendimiento y número de frutos por racimo	46
6.9 Sólidos solubles totales (%)	49
6.10 Firmeza en frutos de tomate	50
6.11 Acidez titulable (%)	51
6.12 Crecimiento y desarrollo de los peces	52
6.13 Estatus nutrimental	55
VII. CONCLUSIONES	61
VIII. LITERATURA CITADA	62

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Producción Pesquera y Acuícola, 2012-2014 (miles de toneladas).	5
Cuadro 2. Porcentaje de amonio no ionizado sobre el nitrógeno amoniacal total a diferentes valores de pH y temperatura (Caló, 2011).	20
Cuadro 3. Significancia estadística y comparación de medias para altura (cm) de planta de tomate cultivada en diferentes intervalos de pH en acuaponía.	42
Cuadro 4. Significancia estimada y comparación de medias para grosor del tallo (mm) de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía. .	43
Cuadro 5. Significancia estimada y comparación de medias para lecturas SPAD de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.	45
Cuadro 6. Significancia estimada y comparación de medias para el rendimiento por racimo y rendimiento total (g planta ⁻¹) de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.	48
Cuadro 7. Significancia estimada y comparación de medias para el número de frutos por racimo de tomate en plantas cultivadas en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.	49
Cuadro 8. Significancia estimada y comparación de medias para los sólidos solubles totales (grados Brix) de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.	50
Cuadro 9. Significancia y comparación de medias para la firmeza (kg · 0.502 cm ⁻²) de frutos de tomate de plantas cultivadas en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.	51
Cuadro 10. Significancia y comparación de medias para el peso (g·tilapia ⁻¹) en tilapias cultivadas en los diferentes intervalos de pH.	53
Cuadro 11. Concentración de macronutrientes minerales (mg L ⁻¹) en el agua de efluentes acuapónicos en los diferentes intervalos de pH y solución nutritiva a los 15, 29, 43, 57, 71, 88, 105 y 111 días después del trasplante.	58
Cuadro 12. Concentración de micronutrientes minerales (mg L ⁻¹) en el agua de efluentes acuapónicos en los diferentes intervalos de pH y solución nutritiva a los 15, 29, 43, 57, 71, 88, 105 y 111 días después del trasplante.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2014a).	4
Figura 2. Morfología externa de la tilapia (Urcelay <i>et al.</i> , 2012).	13
Figura 3. Balance de masas general en un cultivo de peces. El tratamiento ocurre por fuera del tanque (Timmons <i>et al.</i> , 2009).	17
Figura 4. Diagrama de Truog (1947), pH óptimo para la asimilación de elementos.	19
Figura 5. Panorámica del experimento en el interior del invernadero.	24
Figura 6. Distribución de las unidades experimentales completamente al azar en el interior del invernadero.	25
Figura 7. Panorámica de las unidades experimentales mostrando los tanques para los peces y las tinas para la producción de tomate.	25
Figura 8. Medición de altura y lecturas SPAD.	28
Figura 9. Medición de peso, firmeza y sólidos solubles totales en frutos.	29
Figura 10. Medición de peso y longitud del pez.	29
Figura 11. Determinación de NO_3^- y NH_4^+ por arrastre de vapor y determinación de cloruros.	30
Figura 12. Variación del pH durante el periodo de estudio en los diferentes rangos de control del pH en el sistema acuapónico con producción de tilapia y tomate.	33
Figura 13. Conductividad eléctrica (CE) en el medio acuoso en hidroponía y sistemas acuapónicos con diferentes rangos de control del pH a lo largo del periodo de estudio con producción de tilapia y tomate.	35
Figura 14. Oxígeno disuelto del medio acuoso en hidroponía y sistemas acuapónicos con diferentes rangos del pH a lo largo del periodo de estudio con producción de tilapia y tomate.	37
Figura 15. Temperatura mínima, promedio y máxima del efluente en las tinas hidropónicas y tinas de peces con los diferentes rangos de control del pH con producción de tilapia y tomate durante el ciclo de 111 días después del trasplante.	39
Figura 16. Panorámica de la diferencia en altura (cm) de plantas de tomate entre unidades experimentales.	41

Figura 17. Panorama a los 83 ddt de la diferencia en verdor entre los tratamientos de pH; 5.5 a 6.5[†], 6 a 7, 7 a 8 y 8 a 9 correspondientes a T1, T2, T3 y T4 respectivamente. [†]Solución nutritiva Steiner..... 46

Figura 18. A) Comportamiento de la ganancia de peso en tilapia en función de los días después del trasplante (ddt), B) Peso total ganado de tilapias por tratamiento aplicado (diferencia entre el peso final e inicial), C) correlación entre longitud (cm) y peso de tilapia ($\text{g} \cdot \text{tilapia}^{-1}$) y D) correlación entre altura (cm) y peso de tilapia ($\text{g} \cdot \text{tilapia}^{-1}$). P = correlación de Pearson. 6 a 7, 7 a 8 y 8 a 9 corresponden a los tratamientos de pH. Valores con la misma letra, son estadísticamente iguales. DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05). 54

I. INTRODUCCIÓN

La acuicultura se ha convertido en una de las actividades de producción de alimentos más importante a nivel mundial por cubrir las necesidades alimentarias de la población que aumenta rápidamente. En México esta representa una actividad de gran importancia, ya que aparte de generar empleo y divisas, disminuye la importación de productos acuícolas (CIBNOR, 2016); sin embargo, la acuicultura tradicional desecha grandes cantidades de efluentes cargados de nitrógeno provocando un fuerte impacto ambiental (Muñoz, 2012).

Como consecuencia del impacto ambiental y la escasez de agua dulce a nivel mundial se están requiriendo sistemas de producción acuícolas altamente eficientes (Rodríguez *et al.*, 2015). La acuaponía representa una alternativa viable ante estos problemas pues reduce un 90% los requerimientos de agua necesaria para un cultivo normal de peces (Aguilera *et al.*, 2012) y reduce el impacto ambiental al aprovechar los efluentes generados por la acuicultura, lo que representa una alternativa ideal para solucionar el problema de los acuicultores para deshacerse del agua cargada de nitrógeno y, asimismo, contribuir a la solución del problema de los agricultores de cómo conseguir el nitrógeno para sus plantas (Muñoz, 2012).

Cultivos de gran importancia como tilapia (*Oreochromis spp.*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pueden ser manejados bajo sistemas acuapónicos, pues las tilapias poseen cualidades que las convierten en organismos de gran interés por su aparente facilidad de cultivo, entre las cuales destacan: crecimiento acelerado, tolerancia a altas densidades, resistencia a enfermedades, carne de amplia aceptación y alta capacidad de hibridación que pudiera permitir el vigorizar caracteres deseables (Pérez *et al.*, 2004). Asimismo, el tomate es una de las principales hortalizas cultivadas en el mundo de mayor valor económico (Cuesta y Mondaca, 2014) y en México, es el cultivo hortícola de mayor importancia económica y social, por la superficie sembrada, el volumen en el mercado nacional y las divisas generadas (Cruz, 2007).

Uno de los parámetros más importantes que se deben de controlar en los sistemas acuapónicos es el pH, pues este interviene en la nitrificación y disponibilidad de nutrientes

(Merino y Sal, 2007). El rango de pH óptimo para la nitrificación es muy variado, Merino y Sal (2007) señalan que este va de 6 a 9, sin embargo, Rakocy *et al.* (2006) sostienen que el rango óptimo se encuentra entre 7 y 9, mientras que Tyson *et al.* (2001) sugieren que es de 7.5 a 8.0 Sin embargo, la solubilidad de los nutrientes esenciales tales como hierro, manganeso, cobre, zinc y boro es menor a un pH superior a 7.0 y por consecuencia disminuye la disponibilidad de estos para las plantas. Mientras que la solubilidad de fósforo, calcio, magnesio y molibdeno disminuye bruscamente a un pH inferior a 6 (Rakocy *et al.*, 2006).

Por lo anterior, es importante generar información respecto al rango de pH óptimo en sistemas acuapónicos cerrados con biofiltración, para el desarrollo de tilapia (*Oreochromis spp.*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La Acuicultura

2.1.1 La acuicultura en el mundo

La acuicultura se ha convertido en una de las actividades de producción de alimentos más importante a nivel mundial por cubrir las necesidades alimentarias de la población que aumenta rápidamente y con ello, la necesidad de hacerlo de forma sustentable (CIBNOR, 2016).

En todo el mundo la acuicultura es una actividad milenaria que cumple con diversos propósitos, pero hay dos que son centrales: 1) disminuir las presiones sobre los recursos acuícolas existentes, y 2) impulsar la economía local, regional o nacional a base del desarrollo de sus propios recursos (Márquez, 2015). Esta actividad ha tenido cambios importantes; de ser una actividad en caminata a la producción de alimentos para el autoconsumo local, a convertirse en un sector industrializado cuyos productos se consideran materias primas o productos básicos (commodities en inglés, se define como bien económico productivo legalmente y vendido a gran número de individuos) a los mercados internacionales (Lango *et al.*, 2015).

Según la FAO en el 2014, la producción pesquera mundial ha aumentado de forma constante en las últimas cinco décadas (Figura 1) y el suministro de peces comestibles se ha incrementado a una tasa media anual del 3.2%, superando así la tasa de crecimiento de la población mundial del 1.6% pero según las proyecciones, el consumo de pescado anual per cápita en el mundo aumentará de 18.9 kg en el período base a 20.7 kg en 2022.

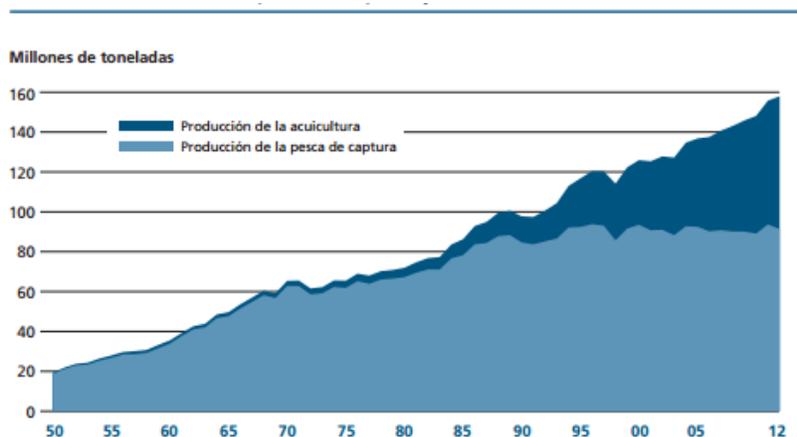


Figura 1. Producción mundial de la pesca de captura y la acuicultura (FAO, 2014a).

2.1.2 La acuicultura en México

En México la acuicultura es una actividad productiva creciente, generadora de divisas y empleos además de ser motor para el desarrollo regional, aplicando tecnologías modernas y compatibles con el medio ambiente; pero sobre todo, representa una importante alternativa en materia alimentaria al ofrecer productos de excelente calidad nutricional y de fácil acceso (SAGARPA, 2014).

La acuicultura representa una actividad de gran importancia, ya que aparte de generar empleo y divisas en nuestro país, disminuye la importación de productos acuícolas (e.g. tilapia y otros peces asiáticos), por lo tanto el principal ejemplo del impacto que puede tener la acuicultura en México sería el de reducir la importación de más de 39,000 toneladas de tilapia (vendido como ‘blanco del Nilo’) procedentes principalmente de China o de más de 47,000 toneladas de basa procedente de Vietnam. Esto implica que alrededor de 3,100 millones de pesos son utilizados para pagar por este recurso a productores extranjeros porque la producción nacional es insuficiente (CIBNOR, 2016).

En México aproximadamente el 80% de los cultivos acuícolas que se desarrollan en el país son de tipo extensivo y con rendimiento bajo (Norzagaray, 2012).

La pesca y acuicultura contribuyen de manera importante para el logro de la seguridad alimentaria de los mexicanos, mediante el abasto de pescados y mariscos para satisfacer la creciente demanda interna. Además, son un importante medio de subsistencia para más de 290 mil familias de pescadores en todo el país (SAGARPA, 2012).

De enero a junio de 2014, la producción pesquera y acuícola nacional fue de poco más de un millón de toneladas en peso vivo (Cuadro 1) de la cual la acuicultura registró una producción de 126.7 miles de toneladas, 10% más que en el 2013, derivado de las especies de tilapia, ostión, carpa y trucha (SAGARPA, 2014).

Cuadro 1. Producción Pesquera y Acuícola, 2012-2014 (miles de toneladas).

Concepto	Datos Anuales			Enero-Junio		
	Observado 2012	Observado 2013	Proyección 2014 ^{e/}	2013	2014 ^{e/}	Variación %
Producción pesquera nacional (Toneladas en peso vivo)^{1/}	1,687.5	1,746.2	1,773.9	892.4	1,006.8	12.8
Captura	1,433.5	1,500.5	1,524.2	777.5	880.0	13.2
Acuicultura	254.0	245.8	249.6	115.0	126.7	10.3
Industrialización (Toneladas en peso desembarcado)^{2/}	536.5	611.0	512.2	346.7	256.1	-26.1

^{1/} La suma de los parciales puede no coincidir con el total debido al redondeo de las cifras.

^{2/} La cifra recortada para 2013, corresponde a cifras preliminares.

^{e/} Cifras estimadas.

2.2 La Acuaponía

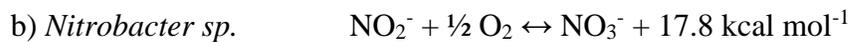
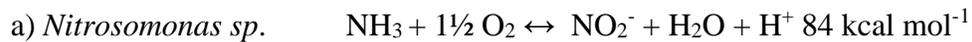
La acuaponía puede definirse como un sistema simbiótico que combina un sistema de acuicultura recirculante con la hidroponía, definiendo acuicultura como el cultivo de animales acuáticos como peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas en ambientes controlados, e hidroponía como el cultivo de plantas colocando las raíces en solución nutritiva, la cual contiene los elementos esenciales (Ramírez *et al.*, 2008).

Aunque las prácticas de piscicultura y de cultivos hidropónicos han sido realizadas desde la antigüedad, la combinación de estos dos, en la investigación es relativamente reciente. Los primeros pasos en este campo, comenzaron en la década de los setenta con investigaciones que buscaban desarrollar sistemas de cultivo de peces a pequeña escala pero hasta la década

de los ochenta, la mayoría de los intentos para integrar la hidroponía y la acuicultura tuvieron éxitos limitados; sin embargo, en 1986, gracias a las innovaciones en los sistemas de recirculación, fue creado el primer sistema acuapónico (llamado sistema acua-vegecultivo) que utilizó los efluentes de tilapia dentro de un cultivo de tomate (Muñoz, 2012).

Esta tecnología está basada en el máximo aprovechamiento de la energía en forma de nutrientes por todos los componentes del cultivo (bacteria, peces y plantas), que además de producir biomasa, contribuye a mantener limpio el ambiente acuático que los contiene (Rodríguez *et al.*, 2015). El funcionamiento de un sistema acuapónico se basa en que los desechos orgánicos producidos por algún organismo acuático (generalmente peces) son convertidos, a través de la acción bacteriana, en nitratos, que sirven como fuente de alimento para plantas. Estas al tomar los nitratos, limpian el agua para el desarrollo los peces actuando como filtro biológico (Ramírez *et al.*, 2009).

Hagopian y Riley (1998) hacen énfasis en la nitrificación por bacterias de NH_3 a NO_3 en un proceso de dos pasos:



Según Rakocy (1999) las hortalizas de hojas y hierbas culinarias reportan mayores ganancias por su alto valor de mercado y corto ciclo de producción. En cuanto a los peces, la tilapia se usa con más frecuencia, aunque en EUA también se produce trucha arcoíris y carpa koi.

Las plantas más utilizadas en este sistema, según Gómez *et al.* (2015) son la lechuga (*Lactuca sativa*), espinaca (*Spinacea oleracea*) y albahaca (*Ocimum basilicum*), que muestran bajos requerimientos nutrimentales y pueden establecerse en sistemas acuapónicos sencillos, mientras que hortalizas como tomate (*Solanum lycopersicum*), pimientos (*Capsicum sp.*) y pepinos (*Cucumis sativus*), requiere mayores suministros nutrimentales, por lo que los sistemas acuapónicos de producción son más complejos.

Ronzón (2012) hace énfasis en que es importante considerar que para el éxito de la actividad acuapónica se requiere que el sistema acuícola produzca suficientes metabolitos nitrogenados para la nutrición de las plantas, y que se inicie el cultivo de las plantas cuando se tenga una colonia madura de bacterias, de lo contrario, el rendimiento será menor al esperado.

Cuanto mayor demanda nutricional necesite una planta (por ejemplo, los frutales), los sistemas deberán mantener una mayor carga de peces que generen nutrientes suficientes. También es importante para estos cultivos de gran demanda nutricional, utilizar sistemas que se encuentren maduros, esto significa, sistemas que lleven funcionando más de 6 meses, preferentemente, un año. Un sistema maduro podrá generar mejor calidad de nutrientes y de una forma más estable (Merino y Sal, 2007).

2.2.1 Ventajas y desventajas de la acuaponía

Muñoz (2012), Aguilera (2012) y ATTRA (2000) han mencionado algunas de las ventajas y desventajas de los sistemas de recirculación de acuaponía:

- Producción de alimentos en áreas reducidas.
- Rendimiento igual o superior al de sistemas hidropónicos.
- Reducción de la cantidad de nitrógeno en descargas de agua.
- Elimina uso de químicos y fertilizantes.
- No hay que preparar soluciones nutritivas.
- La producción de peces es orgánica y de gran calidad.
- Ambas producciones son amigables con el ambiente.
- Los sistemas de recirculación acuapónicos son un medio eficaz para reducir y aprovechar los residuos que normalmente son vertidos al ambiente.
- Debido a que las plantas recuperan un porcentaje sustancial de los nutrientes disueltos, la tasa de intercambio de agua se puede disminuir. Esto reduce los costos de operación en los sistemas acuapónicos en los climas áridos y los invernaderos con calefacción donde el agua representa un gasto importante.

- La rentabilidad es una de las principales preocupaciones cuando se considera el uso de un sistema de recirculación. A menudo estos sistemas son caros de construir y de operar. Sin embargo, mediante la incorporación de un cultivo secundario de plantas, que recibe la mayoría de los nutrientes necesarios sin costo adicional, el beneficio del sistema de cultivo puede mejorar.
- Las plantas utilizadas en el sistema acuapónico purifican el agua de cultivo y, con un adecuado diseño, pueden eliminar la necesidad de biofiltros separados y costosos. Es así como en sistemas de acuaponía, el componente hidropónico puede proporcionar biofiltración suficiente para el cultivo de organismos acuáticos y por lo tanto evitar el costo de compra y operación de un biofiltro separado.

Entre las desventajas hallamos:

- La más obvia de ellas es la proporción entre el área de cultivo de plantas y el área superficial para la cría de los organismos acuáticos. La gran proporción para el cultivo de las plantas se necesita para lograr un sistema equilibrado donde los niveles de nutrientes se mantengan relativamente constantes.
- Uso de bombas, filtros y energía.
- En esencia, los sistemas de acuaponía hacen énfasis en el cultivo de plantas; sin embargo, es importante tener en cuenta que hay dos tipos de producciones, la vegetal y la animal. Por esta razón, es indispensable que se tengan conocimientos suficientes en las áreas de acuicultura y horticultura para poder ofrecer soluciones y mejoras a los sistemas de producción.
- Por último, los sistemas de producción acuapónico deben utilizar métodos de control biológico en lugar de pesticidas para proteger las plantas de plagas y enfermedades. Esto se debe a que los químicos empleados en la producción normal de plantas pueden alterar las características del agua y por ende afectar el componente acuático utilizado en el sistema. Sin embargo, esta restricción puede ser vista como una ventaja, ya que los productos de origen vegetal pueden ser ofrecidos en el mercado como “libres de pesticidas”.

2.2.2 La acuaponía como sistema agroalimentario sustentable

Esta tecnología surge de la necesidad de solucionar problemas de suministro de alimentos de una forma más acorde con los sistemas naturales, ya que no permite el uso de productos fitosanitarios de síntesis química como bactericidas, funguicidas, insecticidas ni herbicidas y por lo tanto los productos obtenidos tienen alto grado de inocuidad, lo que representa una de las formas de producción agrícola más sustentable y respetuosa con el medio ambiente (Gómez *et al.*, 2015).

El tema de la escasez mundial de agua dulce requiere que los sistemas de producción sean altamente eficientes. Actualmente el 70% de las reservas mundiales de agua potable se utilizan en la agricultura, por lo que las innovaciones tecnológicas en esta área han sido implementadas, entre las que destacan la hidroponía y la más reciente, la acuaponía (Rodríguez *et al.*, 2015).

Los beneficios de un sistema acuapónico con un buen diseño y funcionamiento adecuado reduce en un 90% los requerimientos de agua necesaria para un cultivo normal de peces; utiliza tan sólo una décima parte de agua y puede aumentar los rendimientos y bajar los costos de producción sin la necesidad de contar con grandes extensiones de tierra, además de ahorrar en fertilizantes en una producción de hortalizas, ya que el agua de un sistema de producción de peces proporcionan el 80% de los 16 elementos que necesitan las plantas para su desarrollo. No obstante lo anterior, se pueden obtener hasta 500 plantas por metro cuadrado de manera anual, está documentado que por cada tonelada de pescado que se produce por acuaponía por año, se pueden producir alrededor de siete toneladas de algún cultivo vegetal (Aguilera *et al.*, 2012).

La acuaponía es un modelo que sirve para producir en forma sostenible alimentos de alto valor nutritivo; tanto fuente de proteínas (pescado) como fuente de vitaminas y minerales (frijol, jitomate, arroz, frutas, etc.) siguiendo principios de re-uso de aguas residuales, integración de sistemas acuícola-agrícola (que incrementa la diversidad y producción, incluso en espacios reducidos), y obtención de productos sanos con importantes impactos socio-económicos a nivel local (Aguilera *et al.*, 2012).

Este sistema es muy eficaz para reducir el impacto ambiental al aprovechar los efluentes generados por la acuicultura siendo una alternativa ideal para solucionar el problema de los acuicultores para deshacerse del agua cargada de nitrógeno y, asimismo, contribuir a la solución del problema de los agricultores de cómo conseguir el nitrógeno para sus plantas (Muñoz, 2012).

La aplicación de los sistemas acuapónicos, surge como una de las soluciones de producción de alimentos, ya que se están generando dos productos, sin afectar sistemas como los cuerpos de agua y sin deteriorar el suelo, además que por su versatilidad, puede ser instalado en lugares que pueden estar más cercanos al área de los consumidores, lo cual puede reducir costos de transporte así como puede reducir la contaminación generada por el mismo (Ramírez *et al.*, 2009).

2.2.3 Situación actual de la acuaponía en México

La acuaponía es una tecnología para la producción de nuevos y mejores alimentos, y a pesar de que se ha venido implementando desde hace varios años en diversos países, aun no es tan reconocida en México (Gómez *et al.*, 2015).

En la Universidad Autónoma de Guadalajara, desde 2001 realizan ensayos con sistemas de tilapia y langosta australiana en combinación con pepinos, lechugas y tomate (Gómez *et al.*, 2015). También en el Departamento de Acuicultura del Centro de Investigación Científica y Educación Superior (CICESE), en 2013 ha llevado cabo experimentos donde se cultivó tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus*) junto con un cultivo de fresa (*Fragaria ananassa* variedad Camarosa) (Segovia, 2014).

Debido a la problemática del agua en el sector agroindustrial en Baja California, surgió la idea de fundar Acuicultura del Desierto S. de P. R. de R.L, la cual se creó como sociedad de producción rural en el 2004. A partir de que se iniciaron operaciones, la empresa se dedica a producir comercialmente especies acuícolas (Tilapia y trucha arco-iris), hortalizas orgánicas,

especies aromáticas y al desarrollo tecnológico de sistemas agroindustriales, siendo este último donde se le ha dado mayor enfoque (Strassburger, 2014).

En México ya existen organizaciones como Acuaponía México y AcuaponiaMex Consultores, que se dedican al desarrollo del sector acuícola, enfocándose principalmente al ramo *Agri-acuícola*, estas organizaciones se enfocan en la investigación y la prestación de servicios de diseño, desarrollo y transferencia de tecnología, así como asesoría y capacitación en sistemas *Agri-acuícolas*. El objetivo de éstas es impulsar el desarrollo sustentable del sector acuícola de México y Latinoamérica con el fomento de los sistemas *Agri-acuícolas* y las tecnologías amigables con el ambiente (Gongora, 2014).

En México, la acuaponía representa una excelente alternativa para combatir la pobreza, el hambre y la malnutrición de 12 millones de connacionales en situación de pobreza extrema y más de 27 millones en situación de carencia por acceso a la alimentación en concordancia con las actuales políticas públicas de nuestro país, específicamente con el programa “Cruzada nacional contra el hambre” (Gómez *et al.*, 2015).

2.3 El cultivo de tilapia

Las tilapias son peces endémicos originarios de África y el Cercano Oriente, estas han sido introducidas en forma acelerada hacia otros países tropicales y subtropicales en todo el mundo, recibiendo el sobrenombre de las “gallinas acuáticas”, ante la “aparente facilidad de su cultivo” soportado en la rusticidad para su manejo (Urcelay *et al.*, 2012).

Las diferentes especies de tilapia (*Oreochromis spp.*) poseen cualidades que las convierten en organismos de gran interés para la acuicultura, entre las cuales destacan: crecimiento acelerado, tolerancia a altas densidades, resistencia a enfermedades, carne de amplia aceptación y alta capacidad de hibridación que pudiera permitir el vigorizar caracteres deseables (Pérez *et al.*, 2004).

El cultivo de tilapia se ha ido expandiendo gradualmente alrededor del mundo desde 1970. El primer registro de producción de tilapia en México se da en 1970 (200 toneladas). Durante 1984–2002, la producción se incrementó progresivamente a una tasa anual de 12.75%. Para el 2006, la producción oficial reportada por la CONAPESCA fue de 70,823 toneladas, con un valor de 810,919,000 pesos (Vivanco *et al.*, 2010) y su producción para el año 2011 fue de 75,927 toneladas, siendo cultivada en los 32 estados de la República Mexicana (Rodríguez *et al.*, 2015).

Las tilapias son el segundo grupo de peces más producidos por la acuicultura mundial, con una contribución a la producción de aproximadamente 20% del volumen total de peces. La especie *Oreochromis niloticus* (tilapia nilótica) es equivalente a 80% de la producción, seguida de la *Oreochromis mossambicus* con 5% (Urcelay *et al.*, 2012).

El cultivo de la tilapia cultivado por etapas mencionada por Astilapia (2009) es una estrategia empleada para manejar de manera más eficiente la producción, pues permite al productor conocer con mayor precisión variables como:

Etapa 1: **Desarrollo.** Se inicia con la siembra de crías con un peso promedio de hasta un gramo, y son desarrolladas a un peso promedio de 50 gramos, lo cual se logra en un tiempo máximo de tres meses. Cuando los peces alcanzan el peso promedio de 50 g, son separados por longitud o pesos para formar lotes homogéneos.

Etapa 2: **Pre-engorda.** Esta etapa se inicia con peces cuyo peso promedio es de 50 g y se cultivan hasta alcanzar un peso promedio de 200 gramos en aproximadamente 2 meses. Al término de la etapa, los peces nuevamente son separados por longitud o pesos para formar lotes homogéneos e iniciar la siguiente y última etapa de cultivo.

Etapa 3: **Engorda.** Es esta etapa, los peces, cuyo peso promedio inicial es de 200 g, son cultivados hasta alcanzar el peso final para su comercialización, la cual, por lo regular, es de 500 g promedio por tilapia. El tiempo destinado para esta etapa es máximo de tres meses.

En México estas especies son las que regularmente se utilizan en piscicultura y se denominan comúnmente como “tilapias” (Figura 2). La tilapia nilótica (*O. niloticus*, línea Egipcia) es gris con tonalidades verde metálico y bandas verticales de color negro, siendo más notorias en la aleta caudal (Urcelay *et al.*, 2012).



Figura 2. Morfología externa de la tilapia (Urcelay *et al.*, 2012).

2.4 El cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

El tomate es la hortaliza de mayor valor económico en el mundo. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio (Cuesta y Mondaca, 2014).

En México, el tomate es el cultivo hortícola de mayor importancia económica y social, por la superficie sembrada, el volumen en el mercado nacional, y las divisas generadas. Su popularidad se debe al aceptable sabor y disponibilidad del fruto en una amplia gama de ambientes, así como a su relativa facilidad para ser cultivado y la versatilidad de su uso (Cruz, 2007).

La producción de tomate en 2013 fue de 2.7 millones de toneladas, con un rendimiento medio de 57.2 t·ha⁻¹. Los principales estados productores son: Sinaloa, Baja California, Zacatecas, San Luis Potosí y Jalisco. Entre ellos, Sinaloa ocupa el primer lugar con una superficie aproximada de 18,000 ha y una producción cercana al millón de toneladas (SIAP, 2014).

Para poder analizar el rendimiento de una planta, es necesario el estudio de sus componentes. Para el caso del tomate, sus componentes son: el número de frutos por planta y el peso del fruto. Por lo tanto, el número de frutos por planta está determinado por el número de flores que son fecundadas y los frutos que logran desarrollarse. Así, dichos componentes del rendimiento involucran procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, y reproductivo, están fuertemente influenciados por la relación fuente-demanda en diferentes fases del ciclo de la vida de la planta. El peso del fruto, a su vez está determinado por la relación entre la potencia de la fuente y la potencia de la demanda durante el período de crecimiento del fruto (Baldomero, 2007).

El rendimiento de tomates cultivados en invernaderos ha sido principalmente incrementado por cultivos de ciclo largo, por el alto amarre del fruto y la mayor altura de la planta. El futuro incremento en rendimiento, dependerá de un mayor periodo de llenado de frutos, número y tamaño, pero más allá de las características genéticas, deberá ser realizable empleando la tecnología ya disponible (Zamski y Schaffer, 1996).

El tamaño y peso del fruto se encuentran determinados en su aspecto genético y estos caracteres son heredables; sin embargo, pueden modificarse por condiciones ecológicas (temperatura, agua, suelo) y las labores culturales en el cultivo (fertilización, podas, raleo de frutos, riegos, etc.) (Bernabé y Solís, 1999).

La calidad de un producto es la combinación de atributos o caracteres que éste presenta y se determina por el grado de aceptación del consumidor. La calidad del tomate principalmente se evalúa por tres factores: la apariencia física, textura y sabor (Jones, 2007); sin embargo, la calidad nutricional es importante porque los frutos frescos son fuentes de vitaminas (A, B, C, tiaminas, niacinas) minerales y fibra (Kader, 1986).

2.5 Balance de Masas

Un balance de materia es simplemente la aplicación de la ley de conservación de la masa: “*La materia no se crea ni se destruye*”. En un proceso químico, en particular, no es más que el conteo o inventario de cuánto entra, sale y se usa de cada componente químico que interviene en cada proceso. Se podría traducir la ley de conservación de la masa, para este caso, como sigue: *el total de la masa que entra a un proceso o unidad es igual al total de la masa que sale de esa unidad* (Gómez, 2013).

De manera general, Gómez (2013) describe un balance de materia como:

$$\text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} = \text{Acumulación}$$

$$E + G - S - C = A$$

Para procesos reactivos en estado estacionario, la ecuación se reduce a:

$$\text{Entrada} + \text{Generación} - \text{Salida} - \text{Consumo} = 0, \text{ pues no hay acumulación de materia.}$$

Esta expresión puede entenderse mejor de la siguiente manera:

$$\text{Entrada} + \text{Generación} = \text{Salida} + \text{Consumo}$$

Dónde:

- **Entrada**, se considera toda la materia que ingresa al sistema a través de sus fronteras.
- **Generación**, toda la materia que se produce dentro del sistema (cuando el proceso es reactivo).
- **Salida**, corresponde a toda la materia que sale del sistema a través de sus fronteras.
- **Consumo**, se refiere a la materia que se consume o utiliza dentro del sistema (cuando el proceso es reactivo).

- **Acumulación**, corresponde a la materia que se acumula dentro del sistema
($A > 0$ si $E+G > S+C$; $A < S+C$)

Este mismo autor menciona que sí en el proceso no suceden transformaciones químicas de materia, es decir, no hay reacciones químicas involucradas (el proceso es no reactivo), los términos de generación de productos y consumo de reactivos son nulos. En ese caso, la ecuación anterior se simplifica hasta quedar como sigue:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

En acuaponía el balance de masas puede ser utilizado en cualquier variable que afecte la calidad del agua. Simplemente se trata de balancear el transporte de entrada, la producción de un parámetro en particular dentro del tanque de cultivo y el transporte de salida. En una ecuación de palabras se dice que: transporte de entrada + producción = transporte de salida (Timmons *et al.*, 2009).

Un sistema se considera **abierto** cuando se transfiere materia por la frontera del sistema; es decir, que entra materia del entorno al sistema o sale materia del sistema hacia el entorno, o ambas cosas. Un sistema es **cerrado** cuando no tiene lugar una transferencia semejante de materia, durante el intervalo de tiempo en el que se estudia el sistema (Gómez, 2013).

En la Figura 3, Timmons *et al.* (2009) muestra un balance de masa general donde parte del flujo es recirculado y otra parte del flujo es abierto. La caja fuera del tanque representa algún dispositivo de tratamiento o proceso que cambia la concentración del parámetro señalado “x”. Podrían existir varios de estos dispositivos de tratamiento, cada uno referido a una variable diferente de calidad de agua.

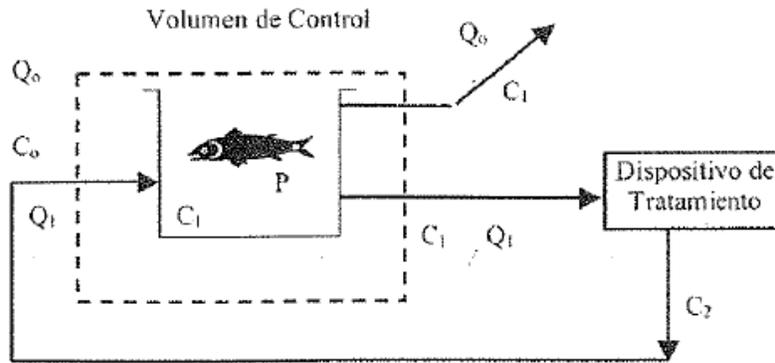


Figura 3. Balance de masas general en un cultivo de peces. El tratamiento ocurre por fuera del tanque (Timmons *et al.*, 2009).

* Q_0 = caudal que pasa por un tanque de cultivo (descarga) $m^3/día$

* Q_t = Caudal de agua recirculada, $kg/día$

* C_0, C_1 y C_2 = concentraciones de parámetros “X” entrando y saliendo de un volumen de control, mg/L .

Para el área ambiental de la acuicultura, el nitrógeno es de central preocupación como componente de los residuos generados en la crianza de peces. El proceso de la remoción de nitrógeno amoniacal en un filtro biológico (dispositivo de tratamiento) se denomina nitrificación, y consiste en la sucesiva oxidación del amoníaco primero a nitrito y finalmente a nitrato (Merino y Sal, 2007).

La filtración biológica puede ser una medida efectiva para controlar el amoníaco; en comparación con el recambio del agua para controlar sus niveles. Existen dos tipos de bacterias las que colectivamente ejecutan la nitrificación (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) (Hagopian y Riley, 1998).

La utilización del sistema acuapónico y recirculación (biofiltros), contribuyen a que amonio, nitritos y nitratos sean reutilizados y aprovechados por las plantas (Rodríguez *et al.*, 2015).

2.6 Tasas de carga

Timmons *et al.* (2009) mencionan que el término carga se usa para describir la masa de peces que pueden ser mantenidos por unidad de caudal de agua, kg de pez por litro por minuto de flujo ($kg/L/min$). La densidad de peces (D_{peces}) definida como kg de peces por metro cúbico

de espacio (kg/m^3), combinando con el número de recambios de agua por hora (R) a través de la unidad de cultivo da como resultado la tasa de carga (L):

$$L = 0.06 \times D_{\text{peces}} / R$$

La constante 0.06 convierte a L/min en m^3/h ($1.0 \text{ L}/\text{min} \times 60 \text{ min}/\text{h} = 60 \text{ L}$ o $0.06 \text{ m}^3/\text{h}$). La capacidad de carga depende principalmente de la calidad de agua, tamaño de peces y especie.

La carga de los peces debe realizarse asegurando un óptimo aporte de oxígeno para la respiración de los peces y una adecuada eliminación del amoníaco excretado y de los restos sólidos de pienso y heces. La capacidad de carga en los estanques también está en función de los requerimientos de espacio de los peces (Jover *et al.*, 2003).

La capacidad de carga es un concepto que marca límites, ya sea por el tamaño de una población, o por la capacidad de los ecosistemas para asimilar los residuos de las actividades antropogénicas (Rojas, 2012).

2.7 Crecimiento de Peces

La premisa de diseño de un sistema de recirculación es de cultivar peces a alguna tasa definida de crecimiento y que esa tasa define la cantidad de alimento necesaria para ellos. La tasa de alimentación de los peces define la generación de residuos y el consumo de oxígeno. Una manera conveniente de definir el crecimiento de los peces se basa en el método de unidades de temperatura y en un número definido de unidades de temperatura para generar una tasa de crecimiento unitaria (Timmons *et al.*, 2009).

Timmons *et al.* (2009) utiliza una fórmula con base en unidades de centímetro mensuales. Los términos de T base y UT base están definidos en observaciones y en el análisis de registros de cultivos.

$$\text{Crecimiento} = T - T_{\text{base}} / UT_{\text{base}}$$

2.8 pH

Uno de los parámetros que se deben de controlar en los sistemas hidropónicos es el pH, con esto nos referimos al grado de acidez o alcalinidad de la solución. El pH es un factor que interviene en varios procesos como en la nitrificación, este puede ocurrir en un rango muy variado como 6 a 9 (Merino y Sal, 2007). Sin embargo, Rakocy (2006) sostiene que el rango óptimo se encuentra entre 7 a 9, mientras que Tyson *et al.* (2001) sugiere que es de 7.5 a 8.

Tyson *et al.* (2001) sugieren mantener pH en el agua cercano al óptimo para la nitrificación (pH 7.5-8.0) en lugar de la óptima para la producción vegetal (pH 5.5 a 6.5), pues los rendimientos de las plantas no se reducen.

La solubilidad de los nutrientes para las plantas también es afectada por el pH de la solución. Los nutrientes esenciales tales como hierro, manganeso, cobre, zinc y boro son menos disponible para las plantas a un pH superior a 7.0, mientras que la solubilidad de fósforo, calcio, magnesio y molibdeno bruscamente disminuye a un pH inferior a 6 (Figura 4) (Rakocy *et al.*, 2006).

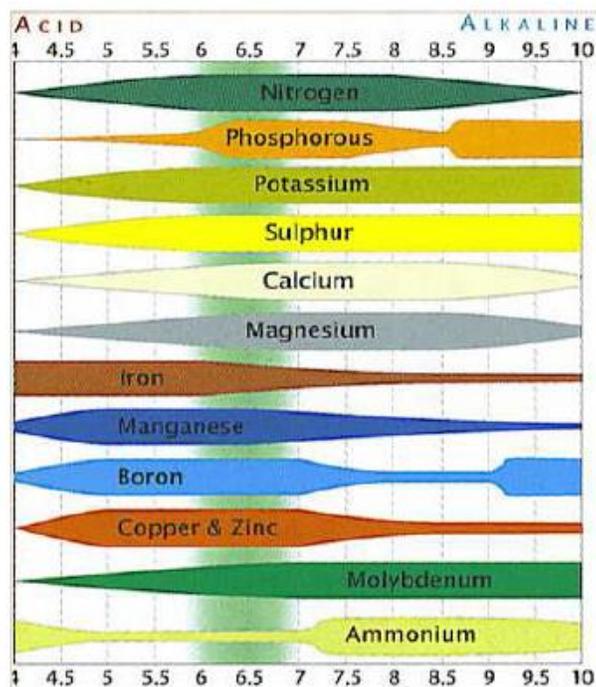


Figura 4. Diagrama de Truog (1947), pH óptimo para la asimilación de elementos.

Lara (2000) menciona que el pH determina la solubilidad, principalmente de P y Ca^{2+} , para evitar su precipitación el pH debe ser mantenido entre 5.5 y 6.0. Caló (2011) también mencionan que las plantas en sistemas acuapónicos suelen tener deficiencias de hierro, y esto se debe a que este nutriente, es el que menor pH requiere para permanecer disponible; por ello, es común tener que suplementar el hierro en sistemas acuapónicos. También es importante tener en cuenta que el amonio no ionizado (NH_3) es extremadamente tóxico para los peces, y su disponibilidad depende del pH y la temperatura del agua (Cuadro 2).

Cuadro 2. Porcentaje de amonio no ionizado sobre el nitrógeno amoniacal total a diferentes valores de pH y temperatura (Caló, 2011).

pH	Temperatura (°C)								
	16	18	20	22	24	26	28	30	32
7.0	0.30	0.34	0.40	0.46	0.52	0.60	0.70	0.81	0.95
7.4	0.74	0.86	0.99	1.14	1.30	1.50	1.73	2.00	2.36
7.8	1.84	2.12	2.45	2.80	3.21	3.68	4.24	4.88	5.27
8.2	4.49	5.16	5.94	6.76	7.68	8.75	10.00	11.41	13.22
8.6	10.56	12.03	13.68	15.40	17.28	19.42	21.83	24.45	27.68
9.0	22.87	25.57	28.47	31.37	34.42	37.71	41.23	44.84	49.02

Caló (2011) mencionan que el pH debe ser adecuado para la especie de pez que se desee cultivar, pero en general, valores dentro de un rango de 7 a 7.5 son buenos para todas las especies. Sin embargo, se debe tener en cuenta que una precisa nitrificación resultará en ácido carbónico, que hará que el sistema tienda a disminuir su pH. No obstante, el descenso de pH en sistemas acuapónicos está ligado con los niveles de K^+ y Ca^{2+} ya que son generalmente insuficientes, estos se añaden en forma de hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] y estas bases se añaden alternativamente varias veces a la semana para mantener el pH cerca de 7.0. La adición de compuestos básicos de K y Ca tiene el doble objetivo de complementar los nutrientes esenciales y neutralizar el ácido (Rakocy *et al.*, 2006).

Tyson *et al.* (2001) trabajaron con pepino en acuaponía con recirculación de agua y con un pH que osciló de 6.0 a 8.0 en el sistema, aumentando así tasa de nitrificación y la producción de NO_3^- producido biológicamente en los niveles de pH más altos, sin afectar rendimiento total. Estos autores siguieron hacer pruebas con otras especies de vegetales de cultivos hidropónicos bajo condiciones acuapónicas para determinar cómo los rendimientos de estos cultivos se afectan por el manejo del pH.

2.9 Conclusiones de la Revisión Bibliográfica

La escasez mundial de agua dulce a nivel mundial es un tema delicado que requiere que los sistemas de producción sean altamente eficientes en la producción de alimentos tanto acuícolas como agrícolas. La acuaponía es una tecnología basada en el aprovechamiento de energías, la cual surge de la necesidad de solucionar los problemas como los altos requerimientos de agua en las prácticas acuícolas reduciéndolos hasta en un 90% (Aguilera *et al.*, 2012), así como en la contaminación de los cuerpos de agua por las altas cantidades de amonio desechado, producto de los efluentes generados por las prácticas acuícolas.

La acuaponía también contribuye en la solución de problemas de suministro de alimentos de una forma más acorde con los sistemas naturales, ya que no permite el uso de productos fitosanitarios de síntesis química, por lo tanto los productos obtenidos tienen alto grado de inocuidad, lo que representa una de las formas de producción agrícola más sustentable y respetuosa con el medio ambiente, dado que la acuaponía incluye la producción tanto de animales acuáticos como de cultivos en hidroponía se genera mayor cantidad de alimentos, mayores ingresos y eleva su uso eficiente de los recursos del agua y fertilizantes (Gómez *et al.*, 2015).

La tilapia (*Oreochromis spp.*) es una buena opción para este sistema acuapónico pues poseen cualidades que las convierten en organismos de gran interés, entre las cuales destacan: crecimiento acelerado, tolerancia a altas densidades, resistencia a enfermedades, carne de amplia aceptación y alta capacidad de hibridación que pudiera permitir el vigorizar caracteres deseables (Pérez *et al.*, 2004), por esto son uno de los peces más producidos por la acuacultura mundial.

Una de las hortalizas de mayor valor económico en el mundo es el tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio (Cuesta y Mondaca, 2014). En México, el tomate es el cultivo hortícola de mayor importancia económica y social, por la superficie sembrada, el volumen en el mercado

nacional, y las divisas generadas (Cruz, 2007). Su estudio en sistemas acuapónicos es relativamente escaso, por lo cual es importante generar información de este cultivo bajo estos sistemas sustentables.

Uno de los factores que interviene en la nitrificación y disponibilidad de nutrientes es el pH (Merino y Sal, 2007). El rango de pH óptimo para la nitrificación es 7.0 a 9.0, pero en la disponibilidad de los nutrientes esenciales como el hierro, manganeso, cobre, zinc y boro están menos disponibles para las plantas a un pH mayor que 7.0, mientras que la solubilidad de fósforo, calcio, magnesio y molibdeno disminuye bruscamente a un pH inferior a 6.0 (Rakocy *et al.*, 2006).

Tyson *et al.* (2001) trabajaron con el cultivo de pepinos en acuaponía con recirculación de agua con un pH que osciló de 6.0 a 8.0, aumentando así tasa de nitrificación en el sistema y la producción de NO_3^- producido biológicamente en los niveles de pH más altos, sin afectar rendimiento total. Este autor sigue haciendo pruebas con otras especies de vegetales de cultivos hidropónicos bajo condiciones acuapónicas para determinar cómo los rendimientos de estos cultivos se ven afectados por el manejo del pH y obtener el más adecuado para nitrificación en biofiltro y así maximizar la sostenibilidad.

Por lo anterior es importante generar información respecto al pH óptimo en sistemas acuapónicos cerrados con biofiltración, para el desarrollo de tilapia (*Oreochromis spp.*) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.).

III. OBJETIVOS

General

Establecer un rango de pH óptimo en la producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tilapia (*Oreochromis niloticus*).

Particulares

1. Evaluar el desarrollo de tilapia y tomate en diferentes rangos de pH en acuaponía.
2. Estimar el aprovechamiento de los nutrimentos por peces y plantas por efecto del pH.

IV. HIPÓTESIS

General

Es posible generar un rango de pH óptimo para el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en acuaponía.

Particulares

1. Existe un pH cercano al óptimo para el desarrollo de tilapia y tomate en acuaponía.
2. Es posible aumentar el aprovechamiento de los nutrimentos por peces y plantas al modificar el pH.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización

El presente trabajo se realizó en uno de los invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo. El sitio se encuentra a una altitud de 2,250 m, con las coordenadas 19°29'18.1"N 98°53'15.8"O. El clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano, época seca en invierno y temperatura media anual de 15.2 °C, siendo mayo el mes más caluroso y enero el más frío. La precipitación media anual es de 635.5 milímetros (Velasco *et al.*, 2005).

5.2. Descripción del Experimento

Se utilizaron 12 unidades experimentales con sistema de recirculación cerrada (Figura 5) en un diseño experimental completamente al azar (DECA). Se establecieron 3 tratamientos en intervalos de pH (6.0 a 7.0, 7.0 a 8.0 y 8.0 a 9.0) y un testigo con solución nutritiva de Steiner a un pH entre 5.5 y 6.5 con 3 repeticiones.

Los tratamientos se distribuyeron de forma aleatoria dentro del invernadero, utilizando el programa estadístico R para la asignación de cada unidad experimental (Figura 6).



Figura 5. Panorámica del experimento en el interior del invernadero.

Distribución aleatoria de las unidades experimentales

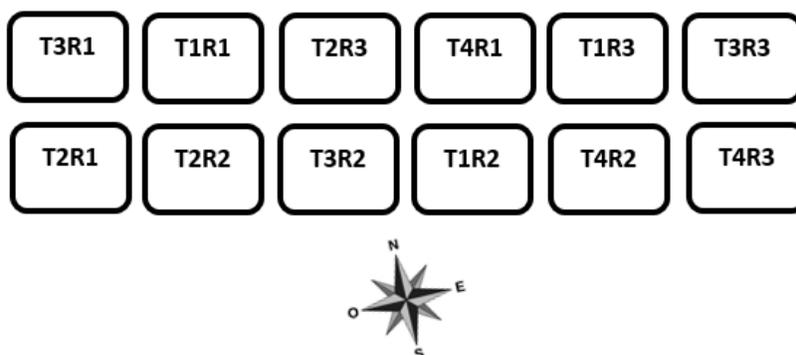


Figura 6. Distribución de las unidades experimentales completamente al azar en el interior del invernadero.

Cada unidad consistió en una tina rectangular de plástico reciclado de 240 litros (1 x 0.6 x 0.4 m), la cual se utilizó como cama de cultivo para el tomate de 0.6 m²; un recipiente cilíndrico con una capacidad de 200 L para los peces, utilizando 150 L de agua; un sistema de riego de tubería de PVC de ½ y de 1” de diámetro; una bomba sumergible de 3 metros de columna de agua, la cual se utilizó para bombear el agua de la tina de los peces a la cama de cultivo; también se usó un soporte de metal (perfil tubular de 1”), para las camas de cultivo. Para el suministro de oxígeno se empleó un oxigenador tipo “blower” marca Elite 802. Se utilizó tezontle nuevo como sustrato para la cama de cultivo de tomate.



Figura 7. Panorámica de las unidades experimentales mostrando los tanques para los peces y las tinas para la producción de tomate.

En cada unidad experimental se ajustó, cada tercer día, el pH para cada tratamiento (6.0 a 7.0, 7.0 a 8.0, 8.0 a 9.0) utilizando ácido sulfúrico. Se midió el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura (medidor semi-portátil Conductronic PC18) y el oxígeno en solución (oxímetro Hanna, modelo HI 9142), con el fin de mantener condiciones óptimas para el desarrollo de las tilapias y que estos no afecten su desarrollo a excepción del tratamiento.

El volumen de agua que se restablecía aforando a 150 litros en el tanque de los peces. Esto se realizó cada 6 días reponiendo el volumen que se consumió por evapotranspiración del sistema en todos los tratamientos por igual.

5.2.1 Conducción de los cultivos

En el experimento se llevaron a cabo los cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y tilapia (*Oreochromis niloticus*). Sus características se describen a continuación.

5.2.1.1 Tomate

Para el establecimiento del experimento en invernadero, se utilizaron plantas nuevas de tomate indeterminado cv. *Saladette*. Se usó una densidad de cuatro plantas por unidad experimental (repetición) (Figura 6) de 0.6 m² útil, distribuidas en dos hileras con dos plantas cada una, separadas por 50 cm entre plantas, 20 cm entre hileras y 20 cm entre hilera y orilla de la cama.

Las plantas se condujeron a un solo tallo. Se eliminaron los brotes axilares del tallo principal durante todo el ciclo de cultivo, esta práctica se hizo manualmente y se inició a los 18 días después del trasplante con el objetivo de guiar a la planta de tomate a un solo tallo. Para mantener el tallo de la planta de tomate en una posición erguida y lograr un mejor manejo sanitario se realizó el tutoreo a los 12 días después del trasplante, el cual consiste en colocar en la parte superior de la nave hileras de alambres sujetadas sobre la base de un marco metálico existente, los que servirán de soporte para afianzar los cordones de rafia amarrados sobre el tallo de la planta (debajo de la primera hoja), dándole dos a tres vueltas en espiral hacia arriba para fijarlo al alambre señalado a una altura aproximada de 3 m.

La cosecha se realizó manualmente y por racimo (conforme maduraron los frutos) y al mismo tiempo se midieron diversas variables.

5.2.1.2 Tilapia

Para llevar a cabo el experimento se utilizaron alevines de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y por cada unidad experimental se colocaron 113 con un promedio de 1.3 g cada uno al inicio. Posteriormente se realizó un raleo de tilapias dejando solo 70 peces por unidad experimental para mantener una relación de 20 a 25 kg m⁻³, la cual resulta como el mejor tratamiento reportado por García y Pérez (2012).

Las dietas se diferenciaron en dos etapas; inicial y engorda. La alimentación inicial de los peces, durante el establecimiento y adaptación, consistió en alimento balanceado en polvo, especial para etapa de cría con la dieta establecida comercialmente para esta especie (tilapia, 3% del peso vivo del pez.) por la marca comercial Nutripec de PURINA®.

En la etapa de engorda se utilizó Nutripec de PURINA®, en presentación para engorda y se alimentaron a los peces dos veces al día, en la mañana y por la tarde.

5.3 Variables Evaluadas

5.3.1 Variables evaluadas en tomate

5.3.1.1 Altura de la planta (AP). Se midió con un flexómetro, se consideró la longitud de tallo desde el nivel del sustrato hasta la parte superior de la planta.

5.3.1.2 Grosor de tallo (GT). Se tomó como punto de referencia para medir mediante un vernier electrónico el primer entrenudo de la planta.

5.3.1.3 Lecturas SPAD. Se tomó con el SPAD modelo 502DL en las hojas recientemente maduras.



Figura 8. Medición de altura y lecturas SPAD.

5.3.1.4 Numero de frutos por racimo (NR). Se sumaron todos los frutos de cada racimo en todos los tratamientos una vez que la mayoría de los frutos maduraron.

5.3.1.5 Rendimiento en peso por racimo (PR). Para la cuantificación de esta variable se sumaron todos los pesos (g) de los frutos obtenidos por racimo una vez que la mayoría de los frutos estuvieron maduros.

5.3.1.6 Sólidos solubles totales (SST). Esta variable fue evaluada en fruto por racimo elegido totalmente al azar de las 4 plantas por repetición con un refractómetro digital de bolsillo PAL-1

5.3.1.7 Acidez titulable. Esta se realizó por medio de titulación de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N. con el método de “acidez total por volumetría”.

5.3.1.8 Firmeza Esta se midió con un penetrómetro portátil (Wagner FDK 160) con punta simétricamente cónica de un diámetro 0.80 cm y longitud 2.10 cm ($\text{kg} \cdot 0.502 \text{ cm}^{-2}$) a un fruto por cada racimo elegido totalmente al azar de las 4 plantas por repetición.



Figura 9. Medición de peso, firmeza y sólidos solubles totales en frutos.

5.3.2 Variables evaluadas en tilapia

5.3.2.1 Peso total (g). Se pesó con ayuda de una balanza granataria, utilizando 20 peces por unidad experimental.

5.3.2.2 Longitud total y Altura (cm). Se midieron con una regla graduada, utilizando 20 peces por unidad experimental.



Figura 10. Medición de peso y longitud del pez.

5.3.3 Variables evaluadas en efluente del sistema

5.3.3.1 Concentración de K, P, Mg, S, Ca, B, Fe, Cu, Mn, Mo, Na, Zn. La concentración de estos elementos se hizo en el laboratorio de nutrición vegetal del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo mediante lectura en equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (ICP-ES 725, Agilent, Mulgrave, Australia).

5.3.3.2 Concentración de NH_4^+ , NO_3^- . La determinación de estos elementos se realizó igualmente en el laboratorio de nutrición vegetal por medio de la técnica de arrastre de vapor (Bremner y Keeney, 1965).

5.3.3.3 Concentración de Cl⁻ La determinación de este elemento en específico se hizo con el método de Mohr realizado también en el laboratorio de Nutrición Vegetal del Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados.

5.3.3.4 Concentración de Oxígeno. Esta variable se midió con un medidor microprocesador de oxígeno disuelto de la marca Hanna instruments (oxímetro Hanna, modelo HI 9142).

5.3.3.5 pH, CE y Temperatura. Estos se midieron con el semi-portatil Conductronic PC18.



Figura 11. Determinación de NO_3^- y NH_4^+ por arrastre de vapor y determinación de cloruros.

5.4 Análisis Estadístico

Los resultados de las variables de respuesta se sometieron a un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias Tukey ($P < 0.05$), en el programa SAS.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 El pH en el desempeño del sistema acuapónico

El sistema acuapónico utilizado cuenta con capacidad de auto regulación de pH para hacer frente a los cambios en el ambiente, por lo cual fue complicado tener estrictamente un punto fijo de pH. Por esta razón se decidió manejar rangos de pH en los diferentes tratamientos. La fluctuación de pH, debido a la auto regulación del sistema, ocurrió cada tercer día a lo largo del experimento en todos los tratamientos (Figura 12), esto concuerda con el trabajo de otros autores como es el caso de Zou *et al.* (2016) que reportan datos similares acerca de la capacidad de amortiguamiento del sistema, donde después de haber iniciado con sus tratamientos de pH regulando con H_2SO_4 y KOH no obtuvo diferencia estable entre sus tratamientos en los primeros 16 días, lo cual se atribuyó a la capacidad regulatoria del sistema. También Tyson *et al.* (2008a) reportan algo similar donde sus tratamientos de pH 5.0, 6.0, 7.0 y 8.0 oscilaron entre 3.8 a 5.9, 5.4 a 6.9, 6.4 a 7.6, 7.2 a 8.5, respectivamente.

También se debe considerar que otros factores como el alimento para los peces, añadido diariamente al sistema, el aforo de agua limpia para reponer la consumida por la evapotranspiración de las plantas y a la absorción de nutrientes (amonio o nitrato) por las plantas pueden jugar un papel importante en la modificación del pH del medio acuoso.

No obstante, a lo largo del experimento, el total de las plantas y peces cultivados sobrevivieron a los diferentes tratamientos, esto refleja, en general, la capacidad del sistema para adaptarse a los diferentes ambientes de pH. Sin embargo, esto repercute con importantes diferencias significativas en la mayoría de las variables en los cultivos de peces y plantas.

En general, pese a esto existe gran controversia sobre el rango óptimo de pH para el sistema acuapónico. Los tratamientos de pH de este experimento (6-7, 7-8 y 8-9) están dentro del rango que maneja la mayoría de los investigadores tanto como para peces, plantas y bacterias nitrificadoras; como es el caso de DeLong *et al.* (2009) que mencionan el rango óptimo para los peces estar entre 6-9, mientras que Timmons *et al.* (2002) muestran un rango más reducido (6.5 a 8.5). En el mismo sentido El-Sherif y El-Feky (2009) reducen aún más el

rango óptimo de pH para esta especie (*Oreochromis niloticus*) de 7.0 a 8.0; ya que a pH menor de 6 se reduce considerablemente la concentración de hemoglobina. Esto muestra que aún existe bastante debate entre investigadores respecto al pH óptimo para los peces.

Asimismo, DeLong *et al.* (2009), Rakocy *et al.* (2004) y Savidov *et al.* (2007) resaltan que para que las bacterias lleven a cabo el proceso de nitrificación, el pH debe ser superior a 7.0. Esto coincide con lo publicado por Chen *et al.* (2006) quienes recalcan un rango de pH óptimo para *Nitrosomonas* de 7.2 a 8.8 y para *Nitrobacter* de 7.2 a 9.0.

Para las plantas el rango aceptable de pH va de 5.5 a 6.5, ya que la solubilidad de los nutrientes es afectada por el pH de la solución. Los nutrientes esenciales tales como hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y boro (B) son menos disponibles para las plantas a un pH mayor a 7.0, mientras que la solubilidad de fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y molibdeno (Mo) disminuye bruscamente a un pH inferior a 6 (Figura 4) (Rakocy *et al.*, 2006).

Tyson *et al.* (2004) muestran datos similares a todos estos autores pues en su investigación hace énfasis sobre el óptimo para los peces (6.5 a 8.5), bacterias nitrificantes (8.5) y plantas (5.5 a 6.5). Sin embargo, concluyen su trabajo argumentando que es difícil recomendar un intervalo óptimo para el sistema acuapónico en general, puesto que si se mantienen los efluentes de 6.5 a 7.0, que son niveles más propicios para la absorción y disponibilidad de nutrientes, así como para mantener los niveles bajos de amoníaco en el agua de recirculación, sería a expensas de la nitrificación. Sin embargo, en trabajos recientes de Tyson *et al.* (2008a) recomiendan un rango de pH de 7.5 a 8.0, con nutrientes aplicados foliarmente, para promover la nitrificación, sin afectar significativamente el rendimiento de pepino (*Cucumis sativus* L.).

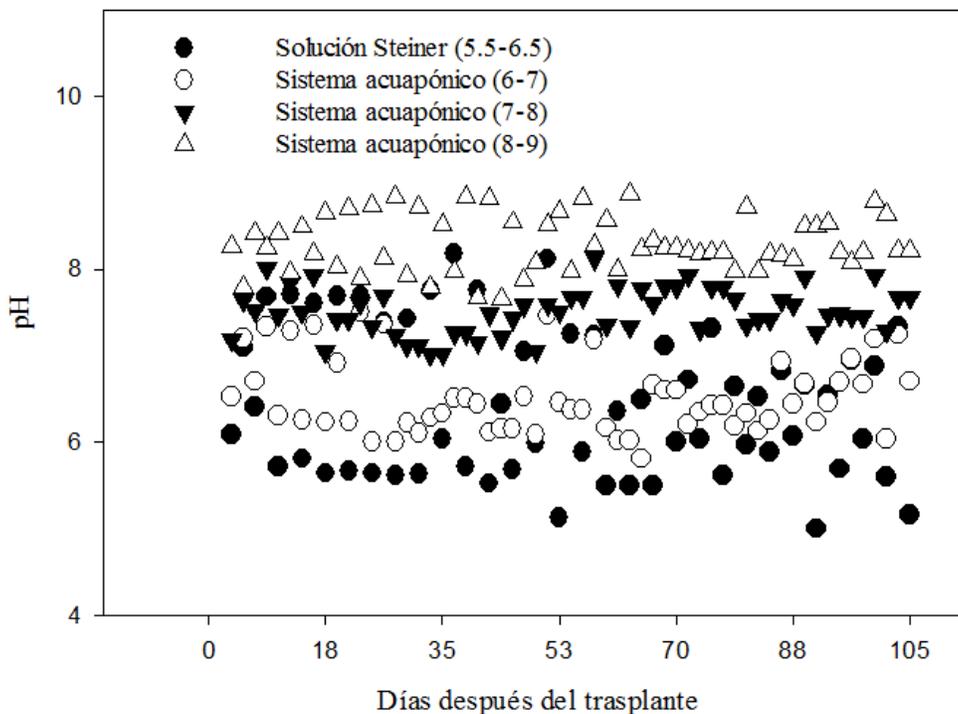


Figura 12. Variación del pH durante el periodo de estudio en los diferentes rangos de control del pH en el sistema acuapónico con producción de tilapia y tomate.

6.2 Conductividad eléctrica

En acuaponía la CE depende de la especie, la densidad y la etapa de los peces, así como de la cantidad, periodicidad y composición del alimento para estos, los recambios de agua, el desarrollo de las plantas y por último de la tasa de mineralización microbiana (Rakocy *et al.*, 2006). Por lo tanto, es difícil generalizar una CE en los sistemas acuapónicos dado que cada uno de estos es único por la gran variabilidad que pueda existir entre estos factores. No obstante, la mayoría de las investigaciones indican que regularmente la CE se encuentra por debajo de 1 dS m^{-1} (Reyes *et al.*, 2016; Rakocy *et al.*, 2006; Liang *et al.*, 2013). Sin embargo, Rakocy *et al.* (2006) aseguran que con estas CE se producen buenos resultados en el desarrollo de las plantas ya que los nutrientes se están generando constantemente en el sistema. Esto concuerda con Khater *et al.* (2015), quienes afirman que el contenido de nutrientes provenientes del efluente de los peces es suficiente para el desarrollo de *S. lycopersicon* y que para aumentar el rendimiento solo es necesario aumentar la velocidad de flujo del efluente (de 4 a 6 L h^{-1}) a las tinajas hidropónicas.

Al respecto, una de las preocupaciones que mencionan Rakocy *et al.* (2006) es la acumulación de nutrientes por los factores antes mencionados que podrían llegar a ser tóxicos para las plantas, esto ocurre en concentración por arriba de 3.5 dS m^{-1} para algunos cultivos, que no fue el caso de este trabajo (Figura 13).

A pesar de todo esto, el comportamiento de la CE de esta investigación fue distinto, ya que esta se debió principalmente a la constante regulación de pH con ácido e hidróxido (Figura 13). La respuesta de la CE en los rangos de pH 6-7 y 8-9 fueron similares ya que estos tratamientos consumieron esos reactivos en mayor cantidad para su modificación, esto se atribuye a la capacidad de auto regulación del sistema anteriormente mencionado. Sin embargo, el rango de pH 7-8 fue distinto puesto que poco de estos reactivos fueron utilizados ya que la mayoría del tiempo se mantuvo en ese rango.

Para el caso del testigo (solución Steiner) la CE tuvo respuesta diferente ya que además de utilizar suficiente ácido para la regulación del pH a lo largo del experimento, se repuso la solución cuando ésta ya se había consumido por la evapotranspiración, por lo cual la concentración de sales se incrementaba drásticamente en este tratamiento, luego de reponer con solución nueva los niveles de CE bajaban (Figura 13).

El registro más alto de CE en los tratamientos acuapónicos a lo largo del experimento fue de $3.43 \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$ correspondiente al rango de pH 8 a 9, por lo tanto, ninguno de los tratamientos de esta investigación representa un riesgo para las plantas de tomate ya que el óptimo para esta especie oscila entre 2.1 y 4.0 en producción (Dorai *et al.*, 2001).

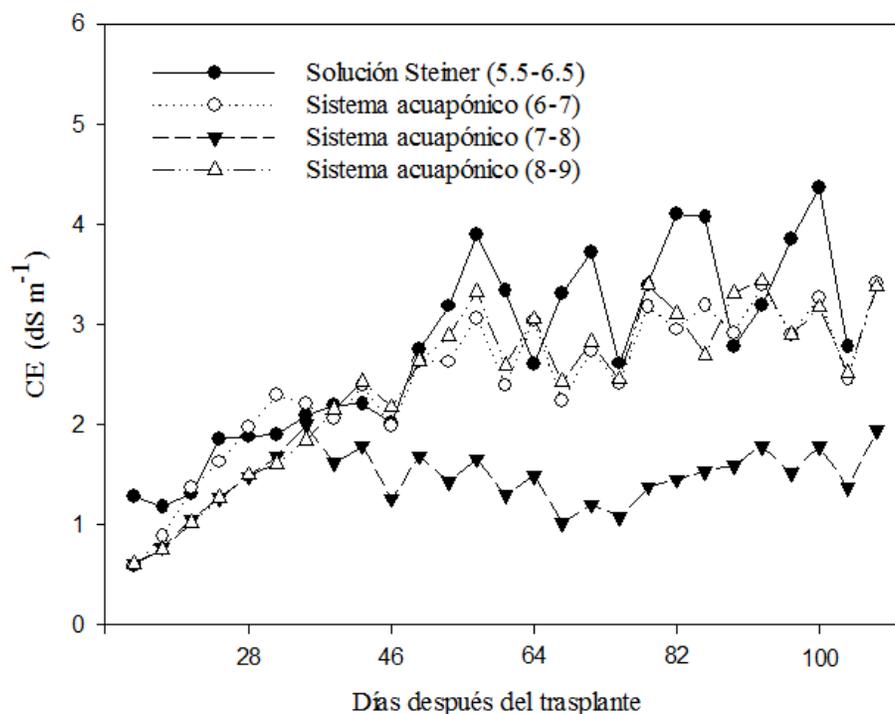


Figura 13. Conductividad eléctrica (CE) en el medio acuoso en hidroponía y sistemas acuapónicos con diferentes rangos de control del pH a lo largo del periodo de estudio con producción de tilapia y tomate.

6.3 Oxígeno disuelto en efluente acuapónico

Uno de los factores importantes en la calidad del agua del sistema acuapónico es la de Oxígeno disuelto (OD), ya que especialmente, en estos sistemas, se generan altas cargas orgánicas que limitan a las plantas, bacterias y peces de un desarrollo óptimo por deficiencia de OD. En situaciones donde no se alcanzan los niveles óptimos, las plantas reducen la absorción de agua y nutrientes. Asimismo, pierden tejido celular de la raíz y esto limita el crecimiento (Rakocy *et al.*, 2006). Igualmente, el comportamiento de peces y bacterias se altera con baja concentración de OD en el sistema, como lo es el rechazo del alimento por parte de los peces y la baja nitrificación por las bacterias (Ramírez *et al.*, 2009).

En este experimento hasta el día 83 después del trasplante el rango de OD en las tinas acuapónicas osciló entre 3.3 y 6.8 mg L⁻¹ (Figura 14). Estos caen en el límite reportado por DeLong *et al.* (2009) quienes mencionan que valores de OD <3.5 presentan efectos negativos

en el crecimiento y alimentación de los peces. Sin embargo, estos autores señalan que estos pueden soportar situaciones de escasas de OD ya que pueden sobrevivir y recuperarse con valores tan bajos como 0.8 mg L^{-1} solo si permanecen en esta concentración en un periodo menor a 10 min.

El intervalo en el que osciló el OD en este experimento está dentro del intervalo que se maneja en la mayoría de las investigaciones (Tyson *et al.*, 2008b; Al-Hafedh *et al.*, 2008; Campos *et al.*, 2013; Rakocy *et al.*, 2004; Pickens, 2015; Hu *et al.* 2015; Zou *et al.*, 2016) aunque algunas otras reportan estar siempre por arriba de 6 mg L^{-1} (Apún *et al.*, 2009; Liang *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2007; Tyson *et al.*, 2004). Desafortunadamente para el día 98 después del trasplante de esta investigación los niveles de OD bajaron drásticamente para los tratamientos 7-8 y 8-9 (Figura 14) ya que en estas se presentaron taponamientos en el sustrato y tuberías por sedimentos orgánicos del mismo sistema y esto generó efluentes turbios por la poca o nula recirculación. Algo similar reportan Rakocy *et al.* (2004) donde sus niveles de OD bajaron del rango $5.0 - 6.0$ a $4.0 - 5.0 \text{ mg L}^{-1}$ por motivo de la turbidez del agua debido a la acumulación de compuestos orgánicos en el sistema acuapónico. Asimismo, Schneider (2004) menciona en su trabajo una disminución drástica de OD debido a las altas cargas de alimentación y su acumulación, lo que disminuyó el OD de 4.3 a 3.6 mg L^{-1} .

En las tinas hidropónicas se registró un máximo de OD de 9.0 y un mínimo de 6.6 mg L^{-1} , esto se debe principalmente a la ausencia de peces y a las bajas temperaturas respecto a las acuapónicas debido a que en estas no se requirieron calefactores. Pickens (2015) reporta algo similar, sus mediciones de OD variaban cerca de 1 mg L^{-1} entre mañana y tarde del día debido a la temperatura del agua.

La presencia de oxígeno en agua es un requisito forzoso en la oxidación del amoníaco. Los requerimientos teóricos de oxígeno de acuerdo con las ecuaciones estequiométricas de nitrificación según Chen *et al.* (2006) son: 3.43 mg para la oxidación de 1 mg de $\text{NH}_3\text{-N}$ y 1.14 mg para la oxidación de 1 mg de $\text{NO}_2\text{-N}$. Por lo tanto, estos autores reportan que para *Nitrosomonas* se requieren concentraciones mayores a 1 mg L^{-1} mientras que para *Nitrobacter* se requieren concentraciones mayores a 2 mg L^{-1} de O_2 . Esto concuerda con Lennard y

Leonard (2006) pues reportan que el mínimo para las bacterias nitrificadoras es de 2 mg L^{-1} , mientras que para los peces de aguas cálidas, como es el caso de la *O. niloticus*, es de 5.0 mg L^{-1} ; por lo tanto, la concentración óptima en el sistema debe ajustarse a la de los peces. Esto concuerda con el intervalo óptimo de 5 y 7.5 mg L^{-1} de OD en los sistemas acuapónicos según otros investigadores (DeLong *et al.* 2009; Colt 2006; Graber y Junge, 2009).

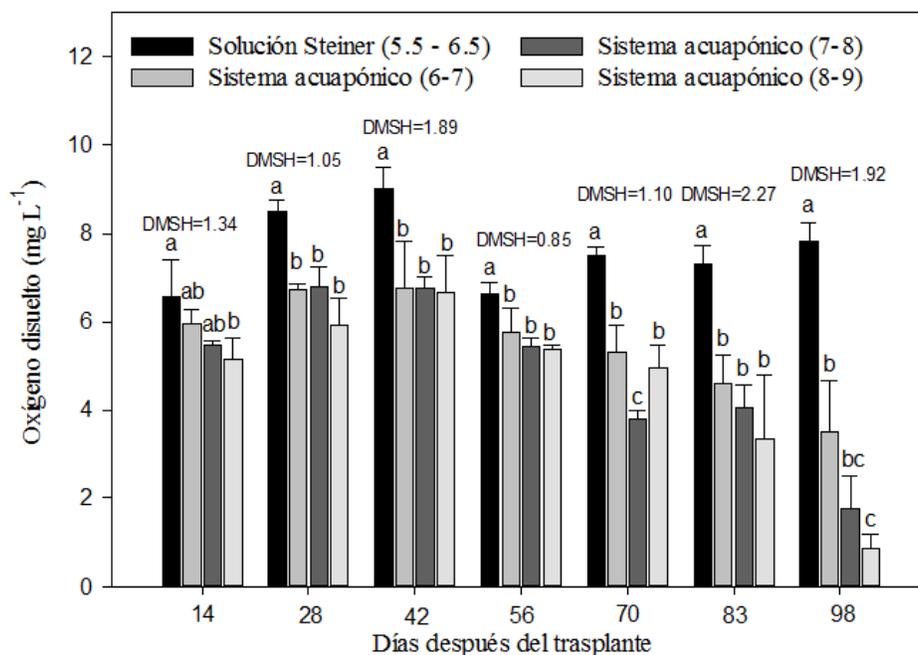


Figura 14. Oxígeno disuelto del medio acuoso en hidroponía y sistemas acuapónicos con diferentes rangos del pH a lo largo del periodo de estudio con producción de tilapia y tomate.

Para *S. lycopersicon* el intervalo en el cual no se afecta el crecimiento, producción y calidad de frutos es de 3 a 7 mg L^{-1} (Soto, 2015), por lo cual las condiciones de esta investigación no representaron un riesgo alguno de hipoxia para las plantas. Incluso Zheng *et al.* (2007) reportan que la concentración óptima en la zona radical está dentro del intervalo de 8.5 a 30 mg L^{-1} ya que no obtuvieron diferencias significativas en el comportamiento de peso fresco y seco de raíz, tallo y hoja, así como en diámetro del tallo y área foliar. Sin embargo, lo contrario sucedió con la respiración de las raíces que aumenta conforme aumenta el OD a partir de 8.5 mg L^{-1} .

6.4 Temperatura

Después del oxígeno disuelto la temperatura es el segundo factor más importante en la calidad de agua en los sistemas acuapónicos ya que esta afecta directamente los procesos fisiológicos de los peces tales como: la tasa de respiración, el metabolismo, crecimiento, comportamiento y reproducción (Waché *et al.*, 2006; Timmons *et al.*, 2009). Esto concuerda con lo reportado por Ronzón *et al.* (2015) quienes observaron que al alcanzar una temperatura de 27 °C las tilapias aumentaron su tasa metabólica y la producción de metabolitos nitrogenados derivados de una mayor biomasa en los estanques; y por tanto, la concentración de amonio incrementa (de 0.1 a 0.6 mg L⁻¹) en el sistema acuícola al aumentar la temperatura de 20 a 27 °C. Asimismo, Rakocy *et al.* (2004) mencionan que a medida que se incrementa la temperatura también lo hace la respuesta a la alimentación de los peces.

En esta investigación la temperatura promedio en los efluentes fue de 25.9 °C, mientras que el rango registrado osciló de 23 a 30 °C en todas las tinas acuapónicas. Este intervalo está dentro del aceptable para los peces de 25 a 32 °C según DeLong *et al.* (2009), y muy próximo al de Azaza *et al.* (2008) que afirman que la temperatura óptima para los peces debe estar lo más cercano a 30 °C.

Sin embargo, en las tinas acuapónicas se obtuvieron escasos registros fuera del límite mayor; las máximas registradas fueron 36.9, 31.4, 31.8 °C y los mínimos de 20.1, 17.9, 19.4 °C para los tratamientos 6-7, 7-8 y 8-9, respectivamente (Figura 15), donde los mínimos están por debajo del umbral que manejan DeLong *et al.* (2009) y Azaza *et al.* (2008) de 22 °C, pues a partir de aquí los peces presentan una lenta actividad metabólica. Sin embargo, ninguna de estas temperaturas fue inferior a 13.6 °C, donde gradualmente empieza la mortandad de peces que aseguran Charo *et al.* (2005).

En las tinas hidropónicas la temperatura promedio fue de 21.7 °C (17.7 - 24.7 °C), esto debido a que estas no contaban con calefactores. Sin embargo, este rango cubre al óptimo de 23.8 °C para la mayoría de las plantas según Rakocy *et al.* (2006), y el de 22 °C de Lara (2000), quien asegura que con este punto en la temperatura la concentración de oxígeno es adecuada

para las plantas. Temperaturas por debajo de 15 °C disminuyen la absorción y asimilación de nutrientes debido a la suberización de la endodermis del ápice de la raíz (Lara, 2000). Por otro lado, a partir de los 35 °C se afecta el transporte en membrana en plantas de tomate; por lo tanto disminuye la absorción de agua y nutrientes, y también disminuye la concentración de NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} en el xilema de la raíz (Falah *et al.*, 20010).

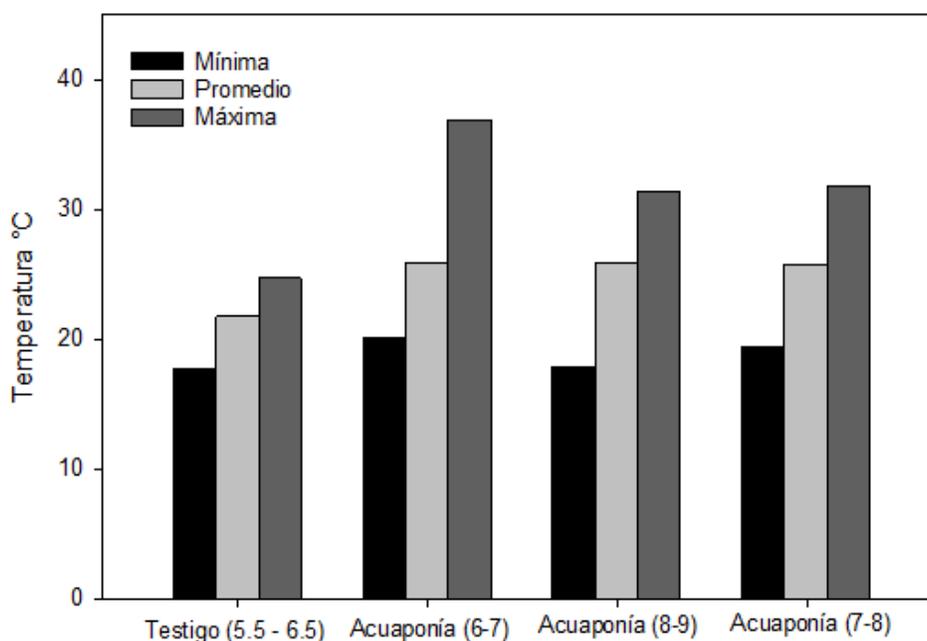


Figura 15. Temperatura mínima, promedio y máxima del efluente en las tinas hidropónicas y tinas de peces con los diferentes rangos de control del pH con producción de tilapia y tomate durante el ciclo de 111 días después del trasplante.

Para el caso de la nitrificación, Chen *et al.* (2006) mencionan que a medida que se aumenta temperatura también lo hace la velocidad de nitrificación ya que los procesos bacterianos bioquímicos se aceleran a medida que aumenta la temperatura. No obstante, a medida que aumenta la temperatura disminuye el OD necesario para las bacterias nitrificantes. Sin embargo, Zhu y Chen (2002) aseguran que no hay diferencia significativa en la nitrificación desde los 14 °C hasta los 27 °C que fue la temperatura mayor de sus tratamientos. Mientras que a 8 °C si muestra una disminución en la nitrificación.

6.5 Altura de plantas de tomate

Los resultados obtenidos en altura (cm) de plantas de tomate, muestran que todos los intervalos de pH estudiados tienen efectos altamente significativos ($p \leq 0.01$) en cada uno de los muestreos (Cuadro 3). Esta variable disminuyó notablemente conforme se fue aumentando el pH de 6.0 a 9.0 correspondientes a los tratamientos acuapónicos. Datos similares reporta Tyson *et al.* (2008a), donde la altura de plantas de pepino disminuyó conforme se incrementaba el pH. Esto se debe a que la solubilidad de los nutrientes es afectada por el pH de la solución. Los nutrientes esenciales tales como hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y boro (B) son menos disponibles para las plantas a un pH mayor a 7.0 (Rakocy *et al.*, 2006).

El mejor tratamiento acuapónico para esta variable, sin duda, fue el de menor pH (6-7). Esto se atribuye a lo anteriormente mencionado, sin embargo, en los primeros 70 ddt este tratamiento fue estadísticamente similar al tratamiento de 7 a 8 de pH, pero superior a partir de los 85 ddt (Cuadro 3). Esto se atribuye a la madurez del sistema a partir de este punto, donde la carga de iones disueltos en el efluente acuapónico fue mucho mayor en comparación a los primeros días del experimento, y por lo tanto a partir de ahí, los iones disponibles para las plantas dependieron estricta y únicamente del pH de los tratamientos lo cual se aprecia en esta variable. Ronzón *et al.* (2012) reportan que al inicio de su investigación la carga de nutrimentos fue muy baja. Sin embargo, a partir de los 45 días se incrementaron los metabolitos derivados de la alimentación, debido al incremento de tamaño del cultivo acuático, no obstante, tampoco fue suficiente para abastecer de nutrimentos a las plantas. Por lo cual, menciona que es necesario que el sistema tenga una madurez de por lo menos 6 meses para tener resultados aceptables en el cultivo vegetal. El tratamiento de 8-9 fue significativamente el peor en todos los casos.



Figura 16. Panorámica de la diferencia en altura (cm) de plantas de tomate entre los tratamientos.

El testigo fue superior significativamente hasta el día 70 después del trasplante, a partir de este punto fue significativamente igual al tratamiento acuapónico de 6 a 7 a excepción del último muestreo (Cuadro 3). Esto puede atribuirse a la madurez del sistema, a partir de este punto donde el tratamiento acuapónico de menor pH superó estadísticamente al tratamiento de 7 a 8 para ser similar al testigo. Por lo que es inminente la necesidad de tener un sistema maduro para el buen desarrollo y crecimiento de las plantas.

Roosta y Hamidpour (2011) reportan que la diferencia en altura de plantas de tomate del sistema acuapónico fue menor en 25%, respecto al hidropónico. En dicha investigación se trabajó con un pH de 7.70 ± 0.06 en el sistema acuapónico. Esto concuerda con nuestros datos en los tratamientos superiores a 7.0, sin embargo, esta diferencia en altura puede reducirse a menos del 10% si el pH lo mantenemos entre 6-7 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Significancia estadística y comparación de medias para altura (cm) de planta de tomate cultivada en diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamiento	Días después del trasplante							
	15	29	43	57	70	85	105	111
	0.006 **	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**
5.5 a 6.5 [†]	9.41 ab	27.31 a	68.58 a	122.91 a	166.62 a	212.5 a	254.58 a	297.92 a
6 a 7	10.10 a	22.89 b	61.20 b	112.33 b	153.38 ab	193.6 a	237.08 a	260.83 b
7 a 8	9.98 a	21.29 b	57.04 b	110.41 b	142.64 b	164.0 b	191.25 b	202.00 c
8 a 9	8.60 b	18.14 c	37.29 c	81.75 c	103.27 c	113.2 c	123.67 c	128.67 d
DMSH	1.18	2.60	5.61	8.54	13.88	23.19	31.98	34.18
CV	11.44	10.65	9.19	7.33	9.00	12.45	14.54	14.10

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01).

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación. [†]Solución nutritiva Steiner.

6.6 Grosor del tallo

A partir de los 29 días después del trasplante se obtuvieron diferencias altamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 4). Los intervalos de 6 a 7 y 7 a 8 de pH fueron similares estadísticamente al testigo en casi todo momento de la investigación a excepción de los días 29 y 105 ddt, donde en este último el tratamiento de 6 a 7 supero al testigo. Por otro lado, el tratamiento más alcalino de 8 a 9 fue el peor en todo momento de esta investigación respecto a los demás.

Datos similares reportan Roosta y Rezaei (2014), quienes evaluaron el efecto del pH de la solución nutritiva sobre crecimiento vegetativo en el cultivo de rosas, aunque este es un cultivo diferente, se obtuvieron datos similares a nuestro experimento. Pues estos autores reportan que a medida que se aumenta el pH de 4.5 a 6.5 el grosor del tallo aumenta significativamente, siendo el de 6.5 el punto con el valor más alto en esta variable, sin embargo, a un pH de 8 obtuvieron el grosor del tallo más bajo. Esto es atribuible al papel que juega el pH en la absorción de nutrientes, pues altos valores de pH afectan la absorción de nutrientes esenciales tales como hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y boro (B) (Rakocy *et al.*, 2006).

Sin embargo, a diferencia de nuestro experimento, investigaciones de Roosta y Hamidpour (2011), muestran que la producción de tomate acuapónico es inferior estadísticamente al

hidropónico para las variables relacionadas al tallo. Esto se debe, entre otras cosas, a la mayor cantidad de nutrimentos en soluciones hidropónicas lo que corresponde a plantas mejor nutridas, de igual manera, las plantas acuapónicas fueron cultivadas en un sistema de raíz flotante sobre la solución acuapónica, contrario a lo que recomienda Schmutz *et al.* (2016) quienes reportan que el sistema de raíz flotante es el menos apropiado para la producción de tomate en acuaponía. Asimismo, Ronzón *et al.* (2015) mencionan que el sustrato donde están las plantas tiene un efecto significativo en el desempeño del cultivo de tomate acuapónico; indican que el sustrato poroso e inerte es el mejor (como el caso de esta investigación) respecto al aeropónico y lluvia sólida con arena sílica.

Por otra parte, Roosta y Mohsenian (2012) reportan una alternativa para aumentar significativamente el grosor del tallo en plantas acuapónicas, pues señalan que con aspersiones foliares de hierro (Fe) usando el FeSO_4 como fuente, se incrementa el diámetro del tallo de 6.24 a 8.40 mm. Esto coincide con lo reportado por Roosta y Hamidpour (2011), quienes aseguran que aspersiones foliares de hierro (Fe), potasio (K), manganeso (Mn), boro (B), magnesio (Mg), zinc (Zn) y cobre (Cu) aumentan significativamente variables relacionadas al tallo.

Cuadro 4. Significancia estadística y comparación de medias para grosor del tallo (mm) de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamientos	Días después de los trasplante							
	15	29	43	57	70	85	105	111
	0.6591 ns	<.0001**	<.0001**	<.0001**	0.0002**	0.0040**	<.0001**	0.0003**
5.5 a 6.5 [†]	0.255 a	0.687 a	10.793 a	12.418 a	14.402 a	15.622 ab	15.600 b	18.119 ab
6 a 7	0.235 a	0.690 a	11.624 a	13.245 a	15.143 a	16.535 a	17.596 a	20.069 a
7 a 8	0.245 a	0.567 b	10.857 a	12.740 a	14.544 a	16.329 a	15.977 ab	18.917 a
8 a 9	0.240 a	0.469 c	8.035 b	10.445 b	12.323 b	13.885 b	13.288 c	16.284 b
DMSH	0.04	0.06	1.72	1.52	1.63	2.00	1.88	2.18
CV	17.31	10.14	15.32	11.47	10.62	11.82	11.09	10.92

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01).

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey,

0.05), CV=coeficiente de variación. [†]Solución nutritiva Steiner.

6.7 Lecturas SPAD

Las plantas del testigo en todos los muestreos, fueron significativamente superiores en verdor al resto de los tratamientos con una probabilidad de error estadístico menor al 0.01% (Cuadro 5). Este verdor en las plantas fue determinado por lecturas SPAD la cual está altamente correlacionada con la concentración de clorofila y nitrógeno en innumerables especies vegetales (Wang *et al.*, 2005).

Los datos de esta investigación concuerdan con lo reportado por Roosta (2014), quien evaluó la respuesta de albahaca en diferentes dosis de riegos acuapónicos e hidropónicos, en las cuales el testigo hidropónico supero estadísticamente al acuapónico en lecturas SPAD. Sin embargo, datos contrarios reportan Roosta y Hamidpour (2011), quienes trabajaron con tomate, estos autores reportan que, en los tratamientos del control, las lecturas SPAD en hojas jóvenes, fue mayor en acuaponía en comparación con hidroponía. Asimismo, Roosta y Afsharipoor (2012) reportan que las lecturas SPAD de hojas jóvenes en el cultivo de fresa fueron mayores en el tratamiento acuapónico en comparación al hidropónico. Por otro lado, Saha *et al.* (2016) reportan que no encontraron diferencias significativas en lecturas SPAD en cultivo de albahaca cultivada bajo sistemas acuapónicos e hidropónicos.

Los resultados de este trabajo pueden deberse a que las plantas del testigo tuvieron una mayor absorción de elementos esenciales, entre ellos N, Mg y Fe, para la formación de la clorofila, tales nutrimentos son componentes estructurales en esta molécula y el Fe que juega un papel importante en su biosíntesis (Roosta, 2014; De la Guardia y Alcántara, 2002); como es el caso que reportan Roosta y Afsharipoor (2012) quienes demuestran que, las tasas de absorción de N, K, P, Fe y Mg fueron mayores en el tratamiento hidropónico que en el tratamiento acuapónico.

En esta investigación los análisis químicos de la solución acuapónica e hidropónica no fueron en su mayoría significativos en nitratos (NO_3^-) dado que al inicio del experimento los tratamientos acuapónicos se acidificaron con ácido nítrico y esto provoco que los niveles de nitrógeno en los tratamientos 6-7 y 7-8 se elevaran considerablemente. Mientras tanto con Mg el testigo y el tratamiento 6-7 en la mayoría de los muestreos fueron superiores al resto

de los tratamientos, ya que el Mg a medida que se aumentaba el pH este disminuía en la solución acuapónica tal como se esperaba, como lo muestra el diagrama de Truog (Truog, 1947). Lo contrario le sucedió a Tyson *et al.* (2008a); donde la concentración de Mg no fue afectada por el pH de sus tratamientos. Sin embargo, la concentración de Fe en todo momento fue significativamente mayor en el testigo en comparación con los tratamientos acuapónicos, esto mismo reporta Roosta (2014), quien hace referencia de que la concentración de Fe en la solución acuapónica fue menor en comparación a la del hidropónico. Por lo tanto, en esta investigación las diferencias entre el testigo y los tratamientos acuapónicos en lecturas SPAD, se atribuyen a la menor absorción de Fe en los tratamientos acuapónicos.

En el caso de los tratamientos acuapónicos; el más bajo en lecturas SPAD siempre fue el de pH más alcalino (8-9) (Cuadro 5). Esto se debe a que el elevado pH indujo una deficiencia de muchos elementos esenciales en las plantas provocando una clorosis en estas. Esto es similar a lo mencionado por Roosta (2014), quien reporta clorosis en todas sus plantas de albahaca tratadas con efluentes acuapónicos con un pH superior a 7.0. Esto concuerda con Pickens (2015) y Tyson *et al.* (2008a), quienes reportan que las concentraciones Fe y Mn en la solución acuapónica disminuyeron a medida que se aumentaba el pH en el sistema posiblemente debido a un efecto del pH en la liberación de estos elementos por los peces.

Cuadro 5. Significancia estimada y comparación de medias para lecturas SPAD de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamientos	Días después del trasplante							
	15	29	43	57	70	85	105	111
	<.0001 **	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**	<.0001**
5.5 a 6.5 [†]	41.00 a	34.95 a	46.46 a	54.40 a	55.80 a	53.75 a	58.60 a	53.83 a
6 a 7	35.90 b	30.93 b	43.75 b	49.38 b	46.20 b	45.42 b	47.41 b	41.517 b
7 a 8	31.86 c	28.44 c	42.80 b	47.41 b	43.91 b	40.64 c	39.65 c	37.608 b
8 a 9	31.18 c	13.70 d	37.95 c	36.34 c	36.25 c	34.64 d	25.02 d	17.558 c
DMSH	4.00	2.33	1.78	2.69	3.35	3.59	5.93	7.12
CV	10.51	7.91	3.82	5.27	6.75	7.56	12.76	17.36

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01).

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey,

0.05), CV=coeficiente de variación. [†]Solución nutritiva Steiner.



Figura 17. Panorama a los 83 ddt de la diferencia en verdor entre los tratamientos de pH; 5.5 a 6.5[†], 6 a 7, 7 a 8 y 8 a 9 correspondientes a T1, T2, T3 y T4 respectivamente. [†]Solución nutritiva Steiner.

6.8 Rendimiento y número de frutos por racimo

Se observaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) en rendimiento (Cuadro 6) y número de frutos por racimo (Cuadro 7) atribuibles a los tratamientos evaluados en esta investigación. Estas variables fueron calculadas por los primeros tres racimos del cultivo a los 85, 105 y 111 ddt.

El tratamiento acuapónico con pH 6 - 7 y el testigo, se mantuvieron sin diferencia estadística en todo momento en estas dos variables. Mientras que el tratamiento pH 7 a 8 fue similar al testigo en las primeras dos cosechas en rendimiento y en las dos últimas en número de frutos

por racimo. Asimismo, los tratamientos 6 a 7 y 7 a 8 fueron diferentes estadísticamente solo en el tercer racimo en rendimiento y en el primer racimo en número de frutos. Por otro lado, el tratamiento de 8 a 9 siempre fue el peor respecto a los demás tratamientos en esta variable. En otro orden, el promedio del rendimiento total, el cual se obtuvo de la sumatoria de los primeros 3 racimos evaluados en este experimento, fue de 2.32, 2.22, 1.90 y 0.67 kilogramos de frutos para el testigo y los tratamientos 6 a 7, 7 a 8 y 8 a 9, respectivamente (Cuadro 6). En este caso el testigo y los tratamientos 6 a 7 y 7 a 8 de pH se mantuvieron sin diferencia significativa, sin embargo, estos superaron significativamente al tratamiento más alcalino el cual presentó valores de hasta un 71.2% menores en producción en comparación al testigo.

Datos similares reporta Tyson *et al.* (2008b) quienes, en las tres cosechas de pepino, no obtuvieron diferencias en rendimiento y número de frutos entre el testigo hidropónico y los tratamientos acuapónicos de 6.0 y 7.0 de pH. Sin embargo, estos superaron al tratamiento más alcalino (8.0) solamente en el primer corte. Esto mismo reporta Tyson *et al.* (2008a), quienes tampoco obtuvieron diferencias en estas dos variables entre sus tratamientos acuapónicos de 5, 6 y 7 de pH en las 10 cosechas de pepino realizadas. Sin embargo, estos superaron de la misma manera al tratamiento más alcalino (8 de pH) solamente en los primeros tres cortes. Estos autores hacen énfasis en que el mantener un pH de recirculación cercano a 8.0 para adecuarlo a la actividad de las bacterias nitrificantes afectaría negativamente al rendimiento temprano, pero no total.

De la misma manera, Mariscal *et al.* (2012), Pickens (2015) y Roosta y Hamidpour (2011) publican que no encontraron diferencias significativas en rendimiento y número de frutos de tomate entre el control hidropónico y el acuapónico. Esto lo atribuyen a una baja, pero estable y constante concentración de elementos, lo que evita el estrés por toxicidad y deficiencias, junto con el desbalance de iones (absorción rápida de iones respecto a otros) que es común en hidroponía. Asimismo, Rakocy *et al.* (2006) también lo atribuyen a que las soluciones acuapónicas contienen cantidades relativamente altas de materia orgánica disuelta y metabolitos orgánicos que pueden contribuir a la disponibilidad de nutrientes, absorción y rendimiento de los cultivos. Al mismo tiempo Graber y Junge (2009) recalcan que esto

también se debe a las altas temperaturas alcanzadas por la solución acuapónica respecto a la hidropónica, esto resulta en un crecimiento inicial más rápido en las plantas, dando lugar a una maduración temprana.

Lo anterior concuerda con Castro *et al.* (2006) quienes demuestran que el número de frutos de tomate puede ser mejorado al ser regados con soluciones acuapónicas, a pesar de que esto resulte en frutos de menor peso, sin embargo, este autor asegura que el incremento de frutos es suficiente para incrementar la productividad en el cultivo de tomate. Khater *et al.* (2015) por su lado refuerza lo anterior, pues demuestra que con solo aumentar el efluente de 4 a 6 L h⁻¹ se incrementa significativamente el rendimiento y número de frutos de tomate un 16%.

De igual forma Roosta y Mohsenian (2012), indican que el rendimiento y número de frutos puede incrementarse significativamente con aplicaciones foliares con FeSO₄ en plantas de chile regadas con efluentes acuapónicos con un pH de 7.5 a 7.8. Mientras que Roosta y Afsharipoor (2012), señalan que el tipo y combinación de sustratos en el que se desarrollan las plantas de tomate cultivadas en acuaponía e hidroponía influye drásticamente en estas variables. Por otra parte, Pickens (2015) reporta lo contrario con una alta diferencia significativa ($p \leq 0.001$) en rendimiento y número de frutos por planta de pepino, entre el tratamiento acuapónico (28 frutos/planta y 3.2 kg/m²) y el hidropónico (39 frutos/planta y 4.5 kg/m²) con una diferencia del 28% en las dos variables.

Cuadro 6. Significancia estadística y comparación de medias para el rendimiento por racimo y rendimiento total (g planta⁻¹) de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamientos	Días después del trasplante			Rendimiento total
	85	105	111	
	<.0001**	0.0003**	<.0001**	<.0001**
5.5 a 6.5 [†]	682.31 a	802.5 a	844.34 a	2329.2 a
6 a 7	663.70 a	693.7 a	869.92 a	2227.3 a
7 a 8	600.90 a	730.9 a	568.21 b	1900.0 a
8 a 9	205.28 b	305.3 b	159.90 c	670.5 b
DMSH	222.49	301.47	236.55	498.91
CV	37.93	43.68	35.54	25.68

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01). Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación.

[†]Solución nutritiva Steiner.

Cuadro 7. Significancia estadística y comparación de medias para el número de frutos por racimo de tomate en plantas cultivadas en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamientos	Días después del trasplante		
	85	105	111
	<.0001**	0.0293*	<.0001**
5.5 a 6.5 [†]	7.166 ab	8.583 a	8.833 a
6 a 7	8.333 a	8.000 ab	9.000 a
7 a 8	6.166 b	8.083 ab	6.750 a
8 a 9	3.000 c	5.417 b	2.167 b
DMSH	2.14	2.97	2.69
CV	31.87	36.23	37.01

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01). Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación.

[†]Solución nutritiva Steiner.

6.9 Sólidos solubles totales (%)

Los sólidos solubles totales (%), fueron estimados en frutos rojos de los primeros tres racimos del cultivo a los 85, 105 y 111 ddt usando un refractómetro. En el cual se observaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) solo en el segundo racimo (Cuadro 8).

Uno de los principales factores que se presentaron en esta investigación por efecto de los tratamientos y que pudo influir en el contenido de azúcar del segundo racimo donde el tratamiento de 8 a 9 de pH presentó superioridad estadística respecto al resto de los tratamientos incluyendo al testigo es el reducido número de frutos por racimo, ya que según Beckles (2012) esto tiene un efecto en la acumulación de azúcares, a causa de que se reduce efectivamente la competencia de asimilados entre los frutos.

Otros factores que afectan la concentración de sólidos solubles en los frutos son: el déficit hídrico en cultivos en maduración (Patanè y Cosentino, 2010; Ozbahce y Tari 2010) y el aumento en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en cultivos en maduración (Yurtseven *et al.*, 2005). Sin embargo, ninguno de estos factores se presentó en este experimento (Figura 7 y 13).

En contraste a este experimento, Suhl *et al.* (2016) y Wortman (2015) reportan que la cantidad de sólidos solubles en los frutos de tomate, fueron significativamente superiores los tratamientos hidropónicos respecto a los acuapónicos.

Cuadro 8. Significancia estadística y comparación de medias para los sólidos solubles totales (grados Brix) de plantas de tomate cultivado en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamientos	Días después del trasplante		
	85	105	111
	0.2649 ns	<.0001**	0.1866 ns
5.5 a 6.5 [†]	5.15 a	4.93 b	6.00 a
6 a 7	5.60 a	5.03 b	5.80 a
7 a 8	5.64 a	5.28 b	6.63 a
8 a 9	5.77 a	6.37 a	6.30 a
DMSH	0.87	0.77	1.06
CV	14.51	13.16	15.74

ns= no significativo ($p > 0.05$), * = significativo ($p \leq 0.05$), ** = altamente significativo (≤ 0.01).

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación. [†]Solución nutritiva Steiner.

6.10 Firmeza en frutos de tomate

La firmeza de frutos fue calculada en tres ocasiones correspondientes a los primeros tres racimos del cultivo a los 85, 105 y 111 ddt (Cuadro 9). Se encontraron diferencias significativas en el tercer racimo; el tratamiento de 8 a 9 de pH superó estadísticamente al de 6 a 7. Sin embargo, esto se debió a que los frutos en el tercer racimo del tratamiento más alcalino (8 a 9), presentaron un comportamiento anormal en maduración, pues estos se mantuvieron en un color verde claro en todo momento a diferencia del resto de los tratamientos, esto puede ser atribuible al bajo contenido de ácido ascórbico (AAs) en las plantas, el cual juega un importante papel como cofactor de muchas enzimas que participan en la maduración de los frutos (Pastori *et al.*, 2003); tal como lo reporta Hou *et al.* (2015) quien demuestra que los niveles de AAs disminuyen conforme se aumenta el pH del medio donde se desarrolla el cultivo de tomate.

Los datos de este experimento oscilaron entre 2.00 a 2.87 kg por 0.502 cm², similares a los obtenidos por Cardona *et al.* (2005) quienes reportan una firmeza en sus tomates de 2.67 y

2.75 kg \cdot 0.502 cm². Sin embargo, estos autores comprueban que esta variable puede ser aumentada hasta 3.97 kg \cdot 0.502 cm² con aplicaciones foliares de calcio.

Cuadro 9. Significancia y comparación de medias para la firmeza (kg \cdot 0.502 cm²) de frutos de tomate de plantas cultivadas en los diferentes intervalos de pH en acuaponía.

Tratamientos	Días después del trasplante		
	85	105	111
	0.2273 ns	0.3002 ns	0.0117*
5.5 a 6.5 [†]	2.00 a	2.35 a	2.61 ab
6 a 7	2.82 a	2.77 a	2.46 b
7 a 8	2.57 a	2.73 a	2.64 ab
8 a 9	2.52 a	2.87 a	3.24 a
DMSH	1.05	0.76	0.63
CV	39.02	26.25	21.34

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01).

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación. [†] Solución nutritiva Steiner.

6.11 Acidez titulable (%)

La acidez titulable fue estimada en una sola ocasión en frutos del segundo racimo a los 105 días después del trasplante. Estos valores de acidez titulable oscilaron entre 0.34 y 0.72% de ácido cítrico. Sin embargo, no se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos. De la misma manera, Casierra y Aguilar (2008) reportan rangos similares a los nuestros para esta variable, oscilando entre 0.6 y 0.7% en tomates maduros.

Por otra parte, Bugarín *et al.* (2002) demostraron que la acidez titulable se mantiene en 0.3% de ácido cítrico, siempre y cuando la solución nutritiva se mantengan valores de potasio (K⁺) entre 6 y 9 meq L⁻¹ en tomate tipo saladette.

El intervalo pH con mejores resultados en un sistema acuapónico de recirculación cerrada estuvo dentro del rango de 6 a 8, presentando superioridad estadística en el desarrollo del cultivo (altura, grosor del tallo y SPAD), y hasta un 232% de mayor producción (Cuadro 6) respecto al rango más alcalino.

6.12 Crecimiento y desarrollo de los peces

Se observaron diferencias significativas en el peso de tilapias en todo momento de la investigación (Cuadro 10). En los días 15 y 29 el tratamiento de 7 a 8 de pH fue superior estadísticamente a los tratamientos 8 a 9 y 6 a 7 respectivamente, sin embargo, en el día 43 se presentaron diferencias altamente significativas, siendo el tratamiento más ácido el peor estadísticamente en comparación con los dos rangos más alcalinos, no obstante, estos dos fueron similares entre ellos, por otro lado, para el día 57 no se mostraron diferencias significativas entre los tratamientos de 6 a 7 y 7 a 8. Asimismo, estos fueron superiores estadísticamente con un 14 y 17.5% respecto al tratamiento de mayor alcalinidad respectivamente. Por el contrario, no se mostraron diferencias significativas a los 70 ddt en ninguno de los tratamientos evaluados. En los días 85, 105 y 111 no se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento de 6 a 7 y 7 a 8, por el contrario, el tratamiento más alcalino presentó una disminución altamente significativa en el peso de tilapias ($\text{g} \cdot \text{tilapia}^{-1}$) desde un 14.6, 16.1 hasta un 21.1% respectivamente.

Los resultados finales obtenidos en los últimos tres muestreos del experimento indican que los tratamientos de pH 6 a 7 y 7 a 8 fueron superiores en el peso de tilapia, presentando una diferencia altamente significativa sobre el tratamiento más alcalino (Figura 16A). Valores similares a los obtenidos en los tres últimos muestreos (85, 105 y 111 ddt) del experimento coinciden con los reportados por Tyson *et al.* (2008b) quienes en un rango de 6 a 8 no encontraron diferencias significativas en el peso de tilapia. Sin embargo, afirman que existe una relación positiva del incremento del pH con el vigor de tilapia en este rango de pH. Conclusiones similares reportan Qiang *et al.* (2009) quienes indican que el pH del efluente que resultó ser más adecuado fue el intervalo de 6.0 a 8.5. Por otro parte, en investigaciones bajo las mismas condiciones de crecimiento Rebouças *et al.* (2015) no encontraron diferencias significativas en los tratamientos de pH 4, 5 y 6, a pesar de esto, presentaron una ganancia altamente significativa en el peso de tilapia entre un 19.9, 20.5 y 13.4% conforme se aumentó el pH a 8 respectivamente. Por lo tanto, se concluyó que esta es una especie acidófila de agua dulce. Del mismo modo Rebouças *et al.* (2016) no encontraron diferencias significativas en peso de tilapia bajo aguas eutróficas, entre los tratamientos de pH

ligeramente ácido (5.5 a 6.5), moderadamente ácido (4.5 a 5.5) y el control que osciló entre 7.5 y 8.5, no obstante, el tratamiento más ácido superó significativamente al más alcalino.

En contraste a los resultados de esta investigación mostrados en el Cuadro 10, El-Sherif y El-Feky (2009), quienes trabajaron en diferentes condiciones (oligotróficas) para la producción de tilapia, señalan que los tratamientos de pH de 7 y 8 resultaron ser los más adecuados para la ganancia de peso de tilapia en comparación con los tratamientos de pH de 6 y 9, resultando ser que el tratamiento de mayor acidez presentó una disminución significativa del 35% y el tratamiento de pH 9 disminuyó un 14.6% en comparación al tratamiento de pH 7 que registró la media más alta en peso al final de la investigación.

Cuadro 10. Significancia y comparación de medias para el peso ($\text{g}\cdot\text{tilapia}^{-1}$) en tilapias cultivadas en los diferentes intervalos de pH.

Tratamientos	Días después del trasplante							
	15	29	43	57	70	85	105	111
	<.0001**	<.0001**	0.0007**	0.0002**	0.349 ns	<.0001**	<.0001**	<.0001**
6 a 7	2.383 c	5.063 b	9.675 b	21.784 a	29.285 a	38.833 a	51.500 a	61.169 a
7 a 8	2.516 a	5.726 a	10.63 a	22.785 a	29.222 a	40.414 a	49.298 a	57.506 a
8 a 9	2.443 b	5.223 b	10.55 a	18.777 b	27.611 a	33.139 b	41.356 b	45.369 b
DMSH	0.03	0.21	0.63	2.32	3.08	3.18	3.80	5.20
CV	2.48	6.66	10.10	25.46	24.89	19.70	18.62	22.07

ns= no significativo ($p > 0.05$), *= significativo ($p \leq 0.05$), **= altamente significativo (≤ 0.01).

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación.

El promedio del peso final ganado, el cual se obtuvo de la diferencia entre el peso final y el peso inicial de este experimento, fue de 58.7, 56.2 y 45.3 $\text{g}\cdot\text{tilapia}^{-1}$ para los tratamientos de pH de 6 a 7, 7 a 8 y 8 a 9 respectivamente. Lo que indica que en este experimento a medida que se aumentó el pH disminuyó el peso ganado en los peces. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de 6 a 7 y 7 a 8, no obstante, estos dos tratamientos superaron de forma significativa al tratamiento más alcalino (Figura 16B). Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos por El-Sherif y El-Feky (2009) quienes afirman que la disminución en la ganancia de peso de tilapias es función del aumento del pH del efluente. Sin embargo, este comportamiento fue a partir de un pH 7, ya que, su tratamiento más ácido de 6 no siguió este patrón.

Para el caso de longitud y altura del pez, en esta investigación se encontró una alta correlación de estas dos variables en función al peso, esta correlación fue independiente a los tratamientos evaluados ya que a lo largo de este experimento los valores de longitud y altura dependieron en todo momento del peso y no de los tratamientos (Figura 16C y D). Por lo anterior, el crecimiento de las tilapias en todo momento fue de forma isométrica, lo que indica que fue proporcional en su peso, longitud y altura. Esto puede traducirse a que los peces pequeños son igualmente pesados en proporción a los más grandes. Valores similares obtuvieron Cabrera y Gutiérrez (2015), quienes trabajaron con huachinango (*Lutjanus peru*) donde reportan el mismo comportamiento al encontrado en esta investigación.

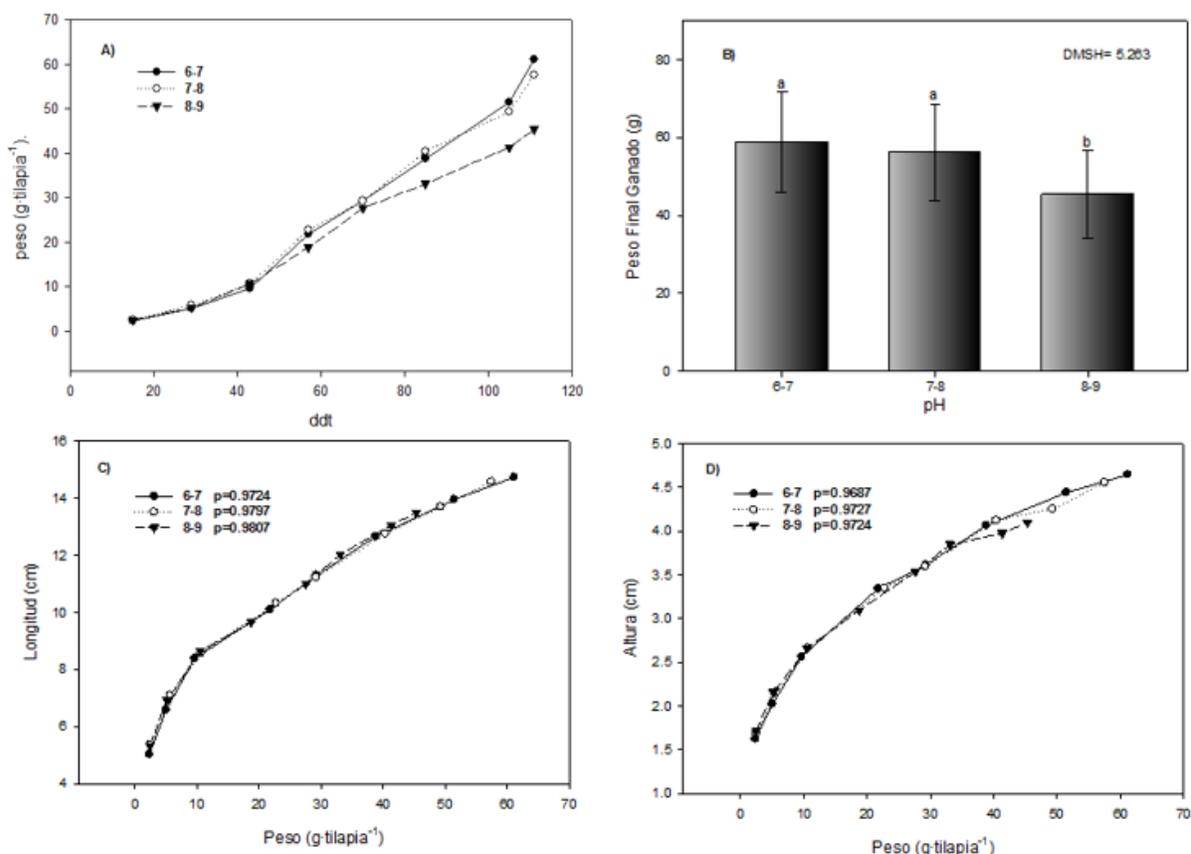


Figura 18. A) Comportamiento de la ganancia de peso en tilapia en función de los días después del trasplante (ddt), B) Peso total ganado de tilapias por tratamiento aplicado (diferencia entre el peso final e inicial), C) correlación entre longitud (cm) y peso de tilapia (g·tilapia⁻¹) y D) correlación entre altura (cm) y peso de tilapia (g·tilapia⁻¹). P = correlación de Pearson. 6 a 7, 7 a 8 y 8 a 9 corresponden a los tratamientos de pH. Valores con la misma letra, son estadísticamente iguales. DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05).

El pH óptimo en un sistema acuapónico de recirculación con sustrato para el crecimiento y desarrollo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) dentro de los rangos evaluados fueron de 6 a 8, los cuales presentaron más de un 21.1% de mayor producción (g·tilapia⁻¹) respecto al tratamiento más alcalino.

6.13 Estatus nutrimental

La concentración de los elementos determinados en el efluente acuapónico fue inconsistente a lo largo del experimento (Cuadros 11 y 12), esto es atribuido a la diferencia que hubo en la cantidad de reposición de agua entre las unidades experimentales para mantener una relación de 20 a 25 kg de pez por m³. Esta diferencia osciló de 30 hasta 120 L por semana. Estas diferencias se deben a la distinta evapotranspiración producida por el efecto de los tratamientos. Del mismo modo, en el testigo se presentó una inconsistencia en la concentración de elementos debido al gran volumen de solución nutritiva retenida por el sustrato, el cual, a causa de la absorción selectiva de minerales por las plantas (Salas y Urrestarazu, 2004) empobreció el medio radical en algunos iones y acumuló otros en exceso a lo largo de la investigación.

La concentración de Ca, Mg, S y P en el efluente disminuyó a medida que aumentamos el pH a lo largo del experimento. Sin embargo, solo Ca, Mg y S mostraron diferencia significativa, no obstante, la respuesta del S en este experimento se debió al ajuste de los tratamientos con H₂SO₄. Estos resultados son similares a los reportados por Tyson *et al.* (2008a) quienes afirman que elementos Ca, P, Fe y Mn disminuyen en concentración a medida que se aumenta el pH del efluente acuapónico, a diferencia del Mg que se mantiene sin afectaciones. Sin embargo, en contraste a este autor, en esta investigación se obtuvieron respuestas distintas para Fe, Mn y Mg, ya que la concentración de NH₄⁺, Fe, Cu, Mn, Mo y Zn entre los tratamientos acuapónicos se mantuvo inconsistente y sin diferencia significativa. Mientras tanto, las concentraciones de B y Cl se conservaron constantes y sin diferencias estadísticas hasta los últimos muestreos, donde el tratamiento más ácido fue superior para B y el tratamiento más alcalino lo fue para Cl respecto al resto. Asimismo, la concentración de

K y Na fue superior en el tratamiento más alcalino en todo momento en comparación a los demás tratamientos, ya que se utilizaron KOH y NaOH para ajustar el pH en este tratamiento.

Por otro lado, las concentraciones del testigo (hidroponía) fueron significativamente superiores en todo momento en la mayoría de los elementos excepto para NH_4^+ , NO_3^- , Mg, Mn, y para Ca a partir del día 71, respecto a los tratamientos acuapónicos. Esta respuesta es similar a lo reportado por Savidov *et al.* (2007), quienes demuestran que después de seis meses operando el sistema con aportaciones mínimas de minerales, los macronutrientes estuvieron muy cercanos en concentración a la solución comercial estándar. Sin embargo, encontraron un constante déficit de Fe, mientras que B y Zn fueron superiores al testigo comercial. Al contrario, Reyes *et al.* (2016) reportan concentraciones deficientes de nutrimentos, en general, a lo largo de su experimento, obteniendo en acuaponía solo un 6, 9, 1, 21, 67 y 1.5% para N, P, K, Ca, Mg y Fe respectivamente de la solución comercial estándar. Sin embargo, contribuciones como la de Khater *et al.* (2015) ayudan a solucionar este problema, ya que demuestran que el consumo de N, P, K, Ca y Mg por las plantas puede ser mejorada significativamente incrementando el flujo acuapónico de 4 a 6 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$. Por otro lado, en elementos como Na y Cl el testigo fue inferior a los acuapónicos en todo momento de la investigación. Respecto a los elementos K, P, S y B, se obtuvieron concentraciones inconsistentes entre muestreos a lo largo del experimento respecto al testigo.

En cuanto a los nitratos, los tratamientos presentaron similitud estadística en la mayoría de los muestreos, dado que los tratamientos de 6 a 7 y 7 a 8 se acidificaron con HNO_3 en dos ocasiones al inicio del experimento lo que provocó que estos tratamientos no resultaron diferentes respecto al rango más alcalino; pH óptimo para el proceso de nitrificación por las bacterias (Chen *et al.*, 2006 y Rakocy *et al.*, 2006). Por otra parte, a los 43, 71 y 88 ddt donde se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, el tratamiento de 6 a 7 siempre fue el de mayor concentración debido a la mayor acidificación con HNO_3 , seguido por el tratamiento más alcalino donde se presentó una mayor nitrificación y por último el tratamiento de 7 a 8. Esto coincide con Zou *et al.* (2016), quienes demuestran que se obtienen mejores resultados de nitrificación a pH 9, ya que la disminución de pH tiene un efecto significativo en la inhibición de las bacterias oxidantes de amoníaco (BOA), por consecuente

se obtiene una mayor acumulación de nitrógeno amoniacal total (NAT; $\text{N-NH}_4 + \text{N-NH}_3$) en tratamientos de menor pH. Sin embargo, en esta investigación no se encontraron diferencias significativas en la concentración de NH_4^+ en ninguno de los tratamientos. De la misma manera, Tyson *et al.* (2008b) y Tyson *et al.* (2008a) obtuvieron una concentración descendente en N amoniacal total (NAT; $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NH}_3$) conforme se aumentó el pH de 6 a 8 del sistema acuapónico y con diferencias significativas entre estas, consecuente a la nitratación que fue menor en el tratamiento de pH 6 respecto a los más alcalinos; y fue el intervalo de 7.5 a 8 el óptimo que favoreció la nitrificación para convertir eficientemente los residuos amoniacales a nitratos. Igualmente, en trabajos acuícolas se han encontrado datos que concuerdan con este comportamiento, como Rebouças *et al.* (2015) y Rebouças *et al.* (2016) quienes encontraron que sus tratamientos de pH de 4, 5 y 6 superaron estadísticamente al de 8 de pH en la concentración de especies amoniacales de efluentes de tilapia al final de su experimento. A conclusiones similares a las anteriores, llegan Savidov *et al.* (2007), quienes reafirman este intervalo óptimo para la eficiencia de las bacterias nitrificadoras en acuaponía. Sin embargo, en el intervalo de pH 6.5 a 7 obtuvieron un aumento gradual de N-NO_3 ; de 0 a 10 mM, lo cual es suficiente nitrógeno para el desarrollo de las plantas.

A pesar de que las concentraciones de N-NO_3 de este experimento superaron a otras investigaciones como la de Reyes *et al.* (2016) quienes alcanzaron solamente 19.2 mg L^{-1} en un sistema acuapónico con tomate y tilapia. Ninguno de los tratamientos acuapónicos de esta investigación superó los 300 mg L^{-1} de N-NO_3 , cumpliendo con estar por debajo del límite de toxicidad por nitratos que afirma DeLong *et al.* (2009) en un sistema acuapónico que ocurre en valores de 300 a 400 mg L^{-1} de N-NO_3 . Por lo cual, la utilización de HNO_3 para acidificación de un sistema acuapónico no representó riesgo para esta investigación.

El tratamiento con el intervalo de pH de 6 a 7 mostró una superioridad estadística en la concentración de Ca y Mg y una similitud estadística al resto de los nutrientes en comparación a los tratamientos más alcalinos del sistema de recirculación con sustrato, asimismo, se demuestra que la utilización de ácido nítrico para la parcial acidificación de un sistema acuapónico puede ser una opción viable para sustituir la eficiencia de nitrificación por las bacterias a pH ligeramente ácidos.

Cuadro 11. Concentración de macronutrientes (mg L⁻¹) en el agua de efluentes acuapónicos en los diferentes intervalos de pH y solución nutritiva a los 15, 29, 43, 57, 71, 88, 105 y 111 días después del trasplante.

Días después del trasplante	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Ca	K	Mg	P	S
15							
5.5 a 6.5 [†]	1.37 c	55.10 a	35.20 a	25.70 a	32.08 a	1.56 a	24.31 a
6 a 7	5.96 a	99.88 a	30.71 a	11.41 b	31.96 a	1.26 a	13.32 b
7 a 8	3.21 b	87.94 a	20.10 b	8.79 b	21.46 ab	1.19 a	9.73 bc
8 a 9	6.88 a	62.68 a	14.82 b	9.12 b	15.37 b	0.83 a	4.69 c
DMSH	1.47	48.64	7.57	11.68	12.99	1.10	8.25
CV	12.89	24.35	11.49	32.47	19.70	34.76	24.26
29							
5.5 a 6.5 [†]	5.96 b	113.19 a	77.45 a	68.42 a	76.16 a	2.88 a	42.14 a
6 a 7	10.10 a	150.85 a	61.66 a	10.60 b	67.94 ab	0.79 b	24.75 b
7 a 8	9.64 a	140.29 a	43.96 b	10.32 b	49.10 bc	0.97 b	16.15 b
8 a 9	10.10 a	125.13 a	27.64 c	29.05 b	36.27 c	1.46 b	6.24 c
DMSH	2.54	56.32	15.78	28.65	26.77	1.32	9.23
CV	10.87	16.27	11.45	37.02	17.84	33.07	15.81
43							
5.5 a 6.5 [†]	5.05 a	123.30 b	75.59 ab	86.22 b	48.86 b	1.444 a	33.11 a
6 a 7	6.88 a	200.44 a	85.00 a	4.21 c	83.09 a	0.000 c	33.11 a
7 a 8	8.03 a	128.81 b	36.98 c	9.44 c	47.75 b	0.005 c	14.75 b
8 a 9	7.34 a	177.94 ab	47.76 bc	121.5 a	55.97 ab	0.616 b	7.12 b
DMSH	3.48	71.61	28.5	25.23	33.50	0.387	9.91
CV	19.52	17.37	17.77	17.42	21.75	28.66	17.22
57							
5.5 a 6.5 [†]	6.88 a	124.67 a	140.63 a	113.2 a	97.74 ab	0.000 a	84.60 a
6 a 7	6.42 a	140.29 a	105.19 a	7.74 b	100.1 a	2.623 a	64.26 a
7 a 8	10.56 a	19.98 a	33.50 b	13.47 b	49.37 bc	0.894 a	21.18 b
8 a 9	5.05 a	93.45 a	40.51 b	120.0 a	45.63 c	0.966 a	8.01 b
DMSH	8.82	158.7	37.4	78.2	49.0	3.40	39.9
CV	46.65	64.16	17.89	47.05	25.60	116.19	34.31
71							
5.5 a 6.5 [†]	6.42 a	167.38 a	197.52 a	198.0 a	157.05 a	0.000 a	123.9 a
6 a 7	8.72 a	213.76 a	104.02 b	3.33 b	117.49 ab	3.369 a	58.87 b
7 a 8	6.88 a	15.38 b	32.72 c	13.70 b	40.25 c	2.785 a	19.48 bc
8 a 9	6.88 a	93.91 ab	39.39 c	155.3 a	56.89 bc	1.580 a	14.38 c
DMSH	3.89	144.5	59.52	72.2	64.71	5.34	42.36
CV	20.57	45.09	24.37	29.81	26.63	105.6	29.90
88							
5.5 a 6.5 [†]	6.42 a	235.34 a	180.1 a	233.2 a	145.62 a	0.208 b	105.1 a
6 a 7	8.26 a	213.76 a	123.3 b	2.62 b	112.90 ab	3.619 a	62.74 ab
7 a 8	6.88 a	25.94 b	37.14 c	13.31 b	50.80 b	3.583 a	26.86 bc
8 a 9	6.88 a	64.98 b	35.46 c	155.4 a	61.71 b	2.644 a	17.36 c
DMSH	3.28	125.1	48.72	83.93	63.76	1.36	42.99
CV	17.66	35.45	19.81	31.73	26.28	20.74	31.01
105							
5.5 a 6.5 [†]	7.57 a	152.45 a	274.2 a	404.4 a	236.10 a	0.000 b	151.5 a

6 a 7	9.87 a	155.21 a	130.1 b	5.38 c	136.27 b	4.739 a	76.51 b
7 a 8	7.80 a	38.34 a	46.40 c	18.62 c	63.28 bc	3.764 ab	34.31 c
8 a 9	5.97 a	80.59 a	37.12 c	167.8 b	53.74 c	2.608 ab	19.23 c
DMSH	3.92	117.5	37.4	80.61	75.67	4.02	39.86
CV	19.23	42.16	11.75	20.68	23.65	55.42	21.65
111							
5.5 a 6.5 [†]	8.03 a	175.41 a	126.6 a	272.3 a	93.66 a	9.24 a	58.18 a
6 a 7	8.95 a	156.36 a	114.5 a	5.98 c	97.49 a	4.50 b	64.89 a
7 a 8	8.03 a	49.13 a	34.62 b	16.28 c	47.47 b	2.43 b	25.58 b
8 a 9	7.80 a	90.69 a	30.01 b	157.2 b	52.44 b	1.51 b	17.51 b
DMSH	7.85	159.8	24.50	47.22	9.81	4.55	11.97
CV	36.57	51.84	12.25	15.98	5.15	39.39	11.01

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación. [†]Solución nutritiva Steiner.

Cuadro 12. Concentración de micronutrientes (mg L⁻¹) en el agua de efluentes acuapónicos en los diferentes intervalos de pH y solución nutritiva a los 15, 29, 43, 57, 71, 88, 105 y 111 días después del trasplante.

Días después del trasplante	Fe	B	Cu	Mn	Mo	Zn	Cl	Na
15								
5.5 a 6.5 [†]	0.0890 a	0.152 a	0.048 a	0.0063 a	0.1133 a	0.192 a	44.31 a	43.12 a
6 a 7	0.0003 a	0.100 ab	0.005 b	0.0016 a	0.0176 b	0.056 b	44.31 a	47.49 a
7 a 8	0.0000 a	0.089 ab	0.001 b	0.0000 a	0.0003 b	0.043 b	44.31 a	48.39 a
8 a 9	0.0000 a	0.076 b	0.000 b	0.0000 a	0.0223 b	0.011 b	44.31 a	45.81 a
DMSH	0.145	0.063	0.008	0.013	0.070	0.05	8.19	26.77
CV	249.62	23.30	22.90	262.99	70.39	29.63	7.07	22.15
29								
5.5 a 6.5 [†]	0.0973 a	0.236 a	0.0530 a	0.0106 a	0.1723 a	0.084 a	45.79 a	51.86 a
6 a 7	0.0023 b	0.143 b	0.0010 b	0.0000 a	0.0096 b	0.025 a	47.27 a	61.62 a
7 a 8	0.0030 b	0.159 b	0.0006 b	0.0000 a	0.0123 b	0.054 a	45.79 a	64.14 a
8 a 9	0.0023 b	0.129 b	0.0006 b	0.0000 a	0.0636 b	0.043 a	44.31 a	68.65 a
DMSH	0.05	0.05	0.011	0.012	0.103	0.112	5.79	21.89
CV	76.80	13.37	30.38	182.11	61.10	82.98	4.83	13.59
43								
5.5 a 6.5 [†]	0.4800 a	0.182 a	0.0380 a	0.0000 a	0.1316 a	0.022 a	44.31 b	33.01 b
6 a 7	0.0000 b	0.172 a	0.0006 b	0.0000 a	0.0356 b	0.017 a	67.95 a	75.94 a
7 a 8	0.0000 b	0.167 a	0.0000 b	0.0000 a	0.0150 b	0.042 a	65.73 a	71.61 a
8 a 9	0.0000 b	0.156 a	0.0026 b	0.0000 a	0.0790 ab	0.033 a	60.56 ab	81.03 a
DMSH	0.071	0.07	0.012	0.00	0.07	0.07	17.62	31.37
CV	22.78	17.69	47.32	--	45.49	106.06	11.29	18.34
57								
5.5 a 6.5 [†]	0.3020 a	0.335 a	0.0326 a	0.0060 a	0.1936 a	0.089 a	25.11 b	58.22 b
6 a 7	0.0000 b	0.210 ab	0.0026 b	0.0580 a	0.0366 b	0.077 a	76.81 a	86.57 ab
7 a 8	0.0050 b	0.166 b	0.0033 b	0.1803 a	0.0393 b	0.024 a	69.42 a	82.26 ab
8 a 9	0.0050 b	0.130 b	0.0013 b	0.0000 a	0.0263 b	0.041 a	79.76 a	107.6 a
DMSH	0.060	0.13	0.017	0.413	0.096	0.086	26.70	42.52
CV	29.74	24.75	66.01	259.04	50.08	56.59	16.26	19.43

<hr/>								
71								
5.5 a 6.5 [†]	0.2493 a	0.439 a	0.0410 a	0.0000 a	0.2123 a	0.122 a	21.42 b	76.08 b
6 a 7	0.0000 b	0.200 b	0.0033 b	0.0633 a	0.0200 b	0.057 ab	81.25 a	101.2 ab
7 a 8	0.0056 b	0.169 b	0.0023 b	0.0000 a	0.0000 b	0.042 b	82.72 a	81.40 b
8 a 9	0.0050 b	0.169 b	0.0030 b	0.0000 a	0.0376 b	0.007 b	100.45 a	154.5 a
DMSH	0.075	0.14	0.010	0.108	0.117	0.075	45.74	60.56
CV	44.22	23.33	33.61	261.4	66.79	50.09	24.48	22.42
<hr/>								
88								
5.5 a 6.5 [†]	0.2806 a	0.430 a	0.0663 a	0.0000 a	0.2366 a	0.069 a	23.64 b	75.04 b
6 a 7	0.0016 b	0.192 b	0.0043 b	0.0286 a	0.0610 b	0.036 a	87.89 a	105.1 b
7 a 8	0.0023 b	0.180 b	0.0036 b	0.0000 a	0.0346 b	0.032 a	74.60 a	99.08 b
8 a 9	0.0030 b	0.185 b	0.0063 b	0.0000 a	0.0710 b	0.045 a	104.88 a	179.4 a
DMSH	0.092	0.14	0.009	0.064	0.154	0.111	49.69	62.02
CV	48.96	22.97	18.77	346.41	58.68	92.52	26.12	20.68
<hr/>								
105								
5.5 a 6.5 [†]	0.3543 a	0.644 a	0.1150 a	0.0000 a	0.3446 a	0.215 a	22.16 c	117.0 b
6 a 7	0.0040 b	0.255 b	0.0083 b	0.0056 a	0.0630 b	0.028 a	93.06 b	130.2 b
7 a 8	0.0096 b	0.215 b	0.0046 b	0.0000 a	0.0180 b	0.006 a	76.81 b	111.6 b
8 a 9	0.0043 b	0.205 b	0.0026 b	0.0000 a	0.0156 b	0.022 a	128.52 a	185.7 a
DMSH	0.169	0.133	0.014	0.012	0.166	0.228	34.43	44.56
CV	69.48	15.46	16.76	346.41	57.66	129.17	16.43	12.51
<hr/>								
111								
5.5 a 6.5 [†]	0.7990 a	0.364 a	0.0846 a	0.0113 a	0.1436 a	0.2440 a	22.16 c	57.24 c
6 a 7	0.0163 b	0.221 b	0.0053 b	0.0000 a	0.0533 ab	0.0413 b	88.63 b	110.1 b
7 a 8	0.0017 b	0.175 c	0.0056 b	0.0000 a	0.0340 ab	0.0046 b	84.20 b	91.67 b
8 a 9	0.0000 b	0.177 c	0.0086 b	0.0000 a	0.0103 b	0.0080 b	132.21 a	170.4 a
DMSH	0.396	0.031	0.018	0.025	0.112	0.062	33.07	25.00
CV	74.26	5.09	27.06	346.41	71.41	32.00	15.46	8.90
<hr/>								

Valores con la misma letra, dentro de la columna, son estadísticamente iguales, DMSH=diferencia mínima significativa honesta (Tukey, 0.05), CV=coeficiente de variación. [†]Solución nutritiva Steiner.

VII. CONCLUSIONES

El intervalo de pH con mejores resultados en este sistema acuapónico de recirculación cerrada con sustrato estuvo dentro del rango de 6 a 8 (tratamientos 6 a 7 y 7 a 8), presentando superioridad estadística en el desarrollo y rendimiento de tomate y tilapia con un 232 y 25.8% superiores al rango más alcalino (8 a 9), respectivamente. Por otro lado, los resultados muestran que a pH de 6 a 7 existe superioridad en la concentración de Ca y Mg y una similitud al resto de los nutrimentos en el efluente acuapónico respecto a los tratamientos más alcalinos. De la misma manera, se demuestra que la utilización de ácido nítrico (HNO_3) para la acidificación parcial de un sistema acuapónico puede ser una opción viable para sustituir la eficiencia de nitrificación por las bacterias a pH ligeramente ácidos.

Sistemas acuapónicos de recirculación cerrada con sustrato y acidificaciones parciales con ácido nítrico para producir tomate (*Solanum lycopersicum* L) y tilapia (*Oreochromis niloticus*), deben mantenerse lo más cercano al intervalo de pH de 6 a 7 en el cual aumenta la concentración de Ca y Mg sin perjudicar la producción de tomates y tilapias. Este rango de pH mejoraría la productividad y sostenibilidad de los sistemas acuapónicos con sustrato. Sin embargo, se recomiendan monitoreos parciales de nitrógeno amoniacal total (NAT; $\text{N-NH}_4 + \text{N-NH}_3$) a lo largo del cultivo para evitar su acumulación.

VIII. LITERATURA CITADA

- Aguilera M., M. E., F. Hernández S., E. Mendieta S., y C. Herrera F. 2012. Producción integral sustentable de alimentos. *Ra Ximhai* 8(3): 71-74.
- Al-Hafedh, Y. S., A. Alam, and M. S. Beltagi. 2008. Food production and water conservation in a recirculating aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. *Journal of the World Aquaculture Society* 39(4): 510-520.
- Apún M., J. P., A. Santamaría M., A. Luna G., S. F. Martínez D., and M. Rojas C. 2009. Effect of potential probiotic bacteria on growth and survival of tilapia *Oreochromis niloticus* L., cultured in the laboratory under high density and suboptimum temperature. *Aquaculture Research* 40(8): 887-894.
- Astilapia. 2009. Curso taller: Cultivo de tilapia (*Oreochromis spp*) a alta densidad en módulos flotantes, con énfasis en buenas prácticas de producción acuícola para la inocuidad alimentaria y para la generación de un producto de calidad suprema. Asociación Sinaloense de Productores de Tilapia A.C. Culiacán, Sinaloa.
- ATTRA. 2000. Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas. Sustainable Agriculture. Horticulture systems guide. University of Arkansas. Fayetteville, AR, USA.
- Azaza, M. S., M. N. Dhraief, and M. M. Kraiem. 2008. Effects of water temperature on growth and sex ratio of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia. *Journal of Thermal Biology* 33(2): 98-105.
- Baldomero Z., N. 2007. Producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con sustratos, bajo invernadero. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Unidad Oaxaca. Oaxaca, México.

- Beckles, D. 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.
- Bernabé, A., y V. Solís. 1999. Evaluación del rendimiento, calidad y precocidad y vida de anaquel de 21 genotipos de jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) en invernadero en Chapingo. Tesis de Licenciatura. Chapingo, México. 85 p.
- Bremner, J. M. and D. R. Keeney. 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Analytica chimica acta* 32: 485-495.
- Bugarín M., R., A. Galvis S., P. Sánchez G., y D. García P. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20(4): 391-399.
- Cabrera M., E., y R. M. Gutiérrez Z. 2015. Producción de huachinango (*Lutjanus peru*) en jaulas flotantes. *Agroproductividad* 8(3): 3-9.
- Caló, P. 2011. Introducción a la acuaponía. Centro Nacional de Desarrollo acuícola (CENADAC). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Santa Ana, Argentina. 15 p.
- Campos P., R., A. Alonso L., A. Avalos D., A. Asiain H., and J. L. Reta M. 2013. Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 939-950.
- Cardona, C., H. Arjona, y H. Araméndiz T. 2005. Influencia de la fertilización foliar con Ca sobre la pudrición apical en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Agronomía Colombiana* 23(2): 223-229.

- Casierra P., F., y Ó. Aguilar A. 2008. Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. *Agronomía Colombiana* 26(2): 300-307.
- Castro, R. S., C. M. B. Azevedo, F. Bezerra N. 2006. Increasing cherry tomato yield using fish effluent as irrigation water in northeast Brazil. *Scientia Horticulturae* 110(1): 44–50.
- Charo K., H., M. A. Rezk, H. Bovenhuis, and H. Komen. 2005. Heritability of cold tolerance in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, juveniles. *Aquaculture* 249(1): 115-123.
- Chen, S., J. Ling, and J. P. Blancheton. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water factors. *Aquaculture Engineering* 34(3): 179–197.
- CIBNOR. 2016. Centro de investigaciones biológicas del noroeste. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología Acuicultura. Investigación. Acuicultura. Informe de avance del Programa Anual de Trabajo 2016. Disponible en: http://intranet.cibnor.mx/sfp/CIBNOR_Avance_del_PAT_II_Trimestre_2016.pdf
- Colt, J. 2006. Water quality requirements for reuse systems. *Aquacultural Engineering* 34(3): 143-156.
- Cruz L., B. 2007. Calidad de semilla de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) por efecto de potenciales osmóticos, calcio y podas bajo condiciones de invernadero. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 177 p.
- Cuesta, G., y E. Mondaca. 2014. Efecto de un biorregulador a base de auxinas sobre el crecimiento de plantines de tomate. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 20(2): 215-222.

- De la Guardia, M. D., y E. Alcántara. 2002. Bicarbonate and low iron level increase root to total plant weight ratio in olive and peach rootstock. *Journal of Plant Nutrition* 25(5): 1021–1032.
- DeLong, D. P., T. M. Losordo, and J. E. Rakocy. 2009. Tank culture of tilapia. Southern Regional Aquaculture Center. Publication 282. USDA. 8 p.
- Dorai, M., A. Papadopoulos, and A. Gosselin. 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie, EDP Sciences* 21(4):367-383.
- El-Sherif, M. S., y A. M. I. El-Feky. 2009. Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. I. Effect of pH. *International Journal of Agriculture and Biology* 11(3): 297-300.
- Falah, M. A. F., T. Wajima, D. Yasutake, Y. Sago, and M. Kitano. 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.
- FAO. 2014a. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Oportunidades y desafíos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 3 y 229. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3720s.pdf>
- FAO. 2014b. The statistics division of FAO has launched a new version of faostat. FAOSTAT. Agricultural Production. Crops Primary. Disponible en: <http://faostat3.fao.org>
- García A., I. N., y E. A. Pérez G. 2012. Balance nutrimental en un sistema de producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) acuapónica. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México, México.

Gómez M., F. C., N. E. Ortega L., L. I. Trejo T., R. Sánchez P., E. Salazar M., J. Salazar O. 2015. La acuaponía alternativa sustentable y potencial para producción de alimentos en México. *Agroproductividad* 8(3): 60-65.

Gómez Q., C. S. 2013. Balances de materia. Introducción a los procesos químicos. Universidad de Los Andes, Venezuela. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/claudiag/DocuIPQ/IPQ%20Balance%20de%20materia%20procesos%20no%20reactivos.pdf>

Gongora E., J. M. 2014. Acuaponía México. Consultores y expertos en el Ramo Agri-acuícola Asesoría. Divulgación Acuícola ACUAPONIA (1). Disponible en: https://issuu.com/divulgacionacuicola/docs/revista_divulgacion_acuicola_agost

Graber, A., and R. Junge. 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246: 147-156.

Hagopian, D. S., and J. G. Riley. 1998. A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering* 18(4): 223-244.

Hou, X., L. Feng, G. Liu, D. A. Saeed, H. Li, Y. Zhang, and Z. Ye. 2015. The influence of growth media pH on ascorbic acid accumulation and biosynthetic gene expression in tomato. *Scientia Horticulturae* 197: 637-643.

Hu, Z., J. W. Lee, K. Chandran, S. Kim, A. C. Brotto, and S. K. Khanal. 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology* 188: 92-98.

Jones, J. B. Jr. 2007. *Tomato Plant Culture in the field, Greenhouse and Home Garden*. Ed. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

- Jover, M., S. Martínez, A. Tomás, y L. Pérez. 2003. Propuesta metodológica para el diseño de instalaciones piscícolas. *Revista AquaTIC* 19: 17-26.
- Kader, A. A. 1986. Effects of posharvest handling procedures on tomato quality. *Acta Horticulturae* 190: 209-217.
- Khater, E. S. G., A. H. Bahnasawy, A. E. H. S. Shams, M. S. Hassaan, and Y. A. Hassan. 2015. Utilization of effluent fish farms in tomato cultivation. *Ecological Engineering* 83: 199-207.
- Lango R., V., J. L. Reta M., y A. Asiain H. 2015. Estrategia local de comercialización de tilapia viva (*Oreochromis* spp.), en Veracruz, México ante la competencia internacional. *Agroproductividad* 8(3): 33.
- Lara H., A. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra* 17(3): 221-229.
- Lennard, W. A., and B. V. Leonard. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International* 14(6): 539-550.
- Liang, J. Y., and Y. H. Chien. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation* 85: 693-700.
- Mariscal L., M. M., F. Páez O., J. L. Esquer M., I. Guerrero M., A. R. del Vivar, and R. Félix G. 2012. Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with low salinity groundwater: Management and production. *Aquaculture* 366, 76-84.

- Márquez C., G., y C. J. Vásquez N. 2015. Estado de arte de la biología y cultivo de pejelagarto (*Atractosteus tropicus*). *Agroproductividad* 8: (3) 44.
- Merino, O. G., y F. M. Sal. 2007. Sistemas de recirculación y tratamiento de agua. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. SENADAC. Santa Ana, Corrientes, Argentina.
- Muñoz, G., M. E. 2012. Sistemas de recirculación acuapónicos. *Informador Técnico*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Edición 76. Enero-diciembre 2012. pp. 123-129.
- Norzagaray, C., M., P. Muñoz S., L. Sánchez V., L. Capurro F., y O. Llános C. 2012. Acuicultura: estado actual y retos de la investigación en México. *Revista Aquatic* (37): 20-25.
- Ozbahce, A., and A. F. Tari. 2010. Effects of different emitter space and water stress on yield and quality of processing tomato under semi-arid climate conditions. *Agricultural Water Management* 97(9): 1405-1410.
- Pastori, G. M., G. Kiddle, J. Antoniow, S. Bernard, S. Veljovic-jovanovic, P. J. Verrier, C. H. Foyer. 2003. Leaf Vitamin C contents modulate plant defense transcripts and regulate genes that control development through hormone signaling. *The Plant Cell* 15(4): 939-951.
- Patanè, C., and S. L. Cosentino. 2010. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management* 97(1): 131-138.
- Pérez, J. E., C. Muñoz, L. Huaquín, y M. Nirchio. 2004. Riesgos de la introducción de tilapias (*Oreochromis sp.*)(Perciformes: Cichlidae) en ecosistemas acuáticos de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 77(1): 195-199.

- Pickens, J. M. 2015. Integrating effluent from recirculating aquaculture systems with greenhouse cucumber and tomato production. Doctoral dissertation. Auburn University. Auburn, AL.
- Qiang, J., Li, R., and H. Wang. 2009. Effects of pH on survival activity index and growth of larvae of hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*). South China Fisheries Science 5(2): 69-73.
- Rakocy, J. E. 1999. The status of aquaponics Part 2. Aquaculture Magazine September-October. 64 – 70.
- Rakocy, J. E., M. P. Masser, and T. M. Losordo. 2006. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. Southern Regional Aquaculture Center. USDA 454: 1-16.
- Rakocy, J.E., R. C. Shultz, D. S. Bailey, and E. S. Thoman. 2004. Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. Acta Horticulturae 2004: 63-69.
- Ramírez, D., D. Sabogal, E. Gómez R., D. Rodríguez C., y H. Hurtado G. 2009. Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico goldfish-lechuga. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas 5:154-170.
- Ramírez, D., D. Sabogal, P. Jiménez, H. Hurtado G. 2008. La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas 4:32-51.
- Rebouças, V. T., F. R. D. S. Lima, D. D. H. Cavalcante, and M. V. C. Sá. 2016. Reassessment of the suitable range of water pH for culture of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. in eutrophic water. Acta Scientiarum. Animal Sciences 38(4): 361-368.

- Rebouças, V. T., F. R. D. S. Lima, D. D. H. Cavalcante, and M. V. C. Sá. 2015. Tolerance of Nile tilapia juveniles to highly acidic rearing water. *Acta Scientiarum. Animal Sciences* 37(3): 227-233.
- Reyes F., M., M. Sandoval V., N. Rodríguez M., L. I. Trejo T., J. Sánchez E., y J. L. Reta M. 2016. Concentración de nutrientes en efluentes acuapónicos para la producción de *Solanum lycopersicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 17:3529-3542.
- Rodríguez G., H., S. G. Rubio C., M. García U., M. Montoya M., F. J. Magallón B. 2015. Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. *Agroproductividad* 8(3): 15-19.
- Rojas C., P. M. y A. Aguilar I. 2012. Estimación de la capacidad de carga en el cultivo de peces en jaulas en el lago de Pátzcuaro, México. *Ciencia Pesquera* 20(2): 23-24.
- Ronzón O, M., M. P. Hernández V., y C. I. Pérez R. 2012. Producción hidropónica y acuapónica de albahaca (*Ocimum basilicum*) y langostino malayo (*Macrobrachium rosenbergii*). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15(2): 63-71.
- Ronzón O., M., M. P. Hernández V., y C. I. Pérez R. 2015. Producción acuapónica de tres hortalizas en sistemas asociados al cultivo semi-intensivo de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*). *Agroproductividad* 8(3): 26-32.
- Roosta, H. R., and I. Rezaei. 2014. Effect of nutrient solution PH on the vegetative and reproductive Growth and physiological characteristics of rose Cv. 'Grand Gala' in hydroponic system. *Journal of Plant Nutrition* 37(13): 2179-2194.
- Roosta, H. R., and S. Afsharipoor. 2012. Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under

- hydroponic and aquaponic cultivation systems. *Advances in Environmental Biology* 6(2): 543-555.
- Roosta, H. R. 2014. Comparison of the vegetative growth, eco-physiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic:aquaponic solutions. *Journal of Plant Nutrition* 37(11): 1782-1803.
- Roosta, H. R., and M. Hamidpour. 2011. Effects of foliar application of some macro-and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 129(3): 396-402.
- Roosta, H. R., and Y. Mohsenian. 2012. Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae* 146: 182-191.
- SAGARPA. 2012. Sexto Informe de Labores. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 1 de agosto de 2012. México, D.F.
- SAGARPA. 2014. Segundo Informe de Labores. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 1 de septiembre de 2014. México, D.F.
- Saha, S., A. Monroe, and M. R. Day. 2016. Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems. *Annals of Agricultural Sciences* 61(2): 181-186.
- Salas S., M. C., y M. Urrestarazu G. 2004. Métodos de riego y fertilización en cultivo sin suelo. *Tratado de cultivo sin suelo*. Madrid: Mundi-Prensa, 159-523.
- Savidov, N. A., E. Hutchings, and J. E. Rakocy. 2007. Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: a new approach to sustainable agriculture in Canada. *Acta Horticulturae* 742: 209-221.

- Schmautz, Z., F. Loeu, F. Liebisch, A. Graber, A. Mathis, T. Griessler Bulc, and R. Junge. 2016. Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water* 8(11): 533.
- Schneider, O., A. K. Amirkolaie, J. Vera C., E. H. Eding, J. W. Schrama, and J. A. Verreth. 2004. Digestibility, faeces recovery, and related carbon, nitrogen and phosphorus balances of five feed ingredients evaluated as fishmeal alternatives in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquaculture Research* 35(14): 1370-1379.
- Segovia Q., M. 2014. Efecto de efluentes de un sistema de recirculación acuícola de *Oreochromis niloticus* “tilapia nilotica” y *Fragaria ananassa* “fresa”. Desarrollo de acuaponía en México. Centro de Investigación Científica y Educación Superior. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/91449150/Acuaponia-en-Mexico>
- SIAP. 2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Atlas Agroalimentario 2014. México, D.F.
- Silva, C. R., L. C. Gomes, and F. R. Brandão. 2007. Effect of feeding rate and frequency on tambaqui (*Colossoma macropomum*) growth, production and feeding costs during the first growth phase in cages. *Aquaculture* 264(1): 135-139.
- Soto B., F. 2015. Oxifertirrigación química mediante riego en tomate hidropónico cultivado en invernadero. *Agronomía Mesoamericana* 26(2): 277-289.
- Strassburger M., E. 2014. Desarrollo de acuaponía en México. Centro de Investigación Científica y Educación Superior. Bofish. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/91449150/Acuaponia-en-Mexico>

- Suhl, J., D. Dannehl, W. Kloas, D. Baganz, S. Jobs, G. Scheibe, and U. Schmidt. 2016. Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management* 178: 335-344.
- Timmons, M. B., M. J. Ebeling, and H. R. Piedrahita. 2009. Acuicultura en sistemas de recirculación. Aquaculture Center. Cayuga Aquaventures, LLC. NRACE Publication No. 101-2009 Spanish.
- Timmons M. B., J. M. Ebeling, F. W. Wheaton, S. T. Summerfelt, and B. J. Vinci. 2002. Recirculating aquaculture systems. Northeast Reg. Aquaculture Center Publ. No. 01-002.
- Truog, E. 1947. Soil reaction influence on availability of plant nutrients. *Soil Science Society of America Journal*, 11: 305-308.
- Tyson, R. V., E. H. Simonne, D. D. Treadwell, M. Davis, and J. M. White. 2008a. Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. *Journal of Plant Nutrition* 31(11): 2018-2030.
- Tyson, R. V., E. H. Simonne, D. D. Treadwell, J. M. White, and A. Simonne. 2008b. Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience* 43(3): 719-724.
- Tyson, R. V., E. H. Simonne, J. M. White, and E. M. Lamb. 2004. Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: the pH levels. *Proceedings Florida State Horticulture Society* 117: 79-83.
- Tyson, R. V., D. D. Treadwell, and H. E. Simonne. 2001. Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology* 21(1): 6-13.
- Urcelay G., E., F. J. Macal N., C. A. Jiménez S., E. A. Mendoza Q., F. Guzmán J., D. M. Montaña A., L. J. Basualdo R. 2012. Criterios Técnicos y Económicos para la

Producción Sustentable de Tilapia en México. Comité Sistema Producto Tilapia de México AC. 2012. Proyecto Integral de Capacitación 2012, en beneficio de los productores de tilapia del País. SAGARPA.

Velasco Z., M. E., A. Hernández G., y V. A. González H. 2005. Rendimiento y valor nutritivo del ballico perenne (*Lolium perenne* L.) en respuesta a la frecuencia de corte. Técnica Pecuaria en México, 43(2): 247-258.

Vivanco A., M., F. J. Martínez C., y I. C. Taddei B. 2010. Análisis de competitividad de cuatro sistema-producto estatales de tilapia en México. Estudios Sociales (Hermosillo, Son.) 18(35): 165-207.

Waché, Y., F. Auffray, F. J. Gatesoupe, J. Zambonino, V. Gayet, L. Labbé, and C. Quentel. 2006. Cross effects of the strain of dietary *Saccharomyces cerevisiae* and rearing conditions on the onset of intestinal microbiota and digestive enzymes in rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss*, fry. Aquaculture 258(1): 470-478.

Wang, Q., J. Chen, R. H. Stamps, and Y. Li. 2005. Correlation of visual quality grading and SPAD reading of green-leaved foliage plants. Journal of Plant Nutrition 28(7): 1215-1225.

Wortman, S. E. 2015. Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. Scientia Horticulturae 194: 34-42.

Yurtseven, E., G. D. Kesmez, and A. Ünlükara. 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*). Agricultural Water Management 78(1): 128-135.

- Zamski, E. and A. A. Schaffer. 1996. Tomato. *In*: Photoassimilate distribution in plant and crops: source-sink relationships. British Herbal Medicine Association, Bornemouth (United Kingdom). Books in soils.
- Zheng, Y., L. Wang, and M. Dixon. 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Horticulturae* 113(2): 162-165.
- Zhu, S., and S. Chen. 2002. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering* 26(4): 221-237.
- Zou, Y., Z. Hu, J. Zhang, H. Xie, C. Guimbaud, and Y. Fang. 2016. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. *Bioresource Technology* 210: 81-87.